



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

**GRADO EN INGENIERÍA DE RECURSOS  
MINERALES Y ENERGÍAS**

**PROYECTO FIN DE GRADO**

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS  
SÍSMICAS COMO HERRAMIENTA  
PARA LA OBTENCIÓN DE  
PARÁMETROS GEOMECÁNICOS  
DEL TERRENO EN LA  
URBANIZACIÓN CAMPOSOL,  
(MAZARRÓN)**

**DIRECTOR: Dr. PEDRO MARTÍNEZ PAGÁN**

**AUTOR: D. PEDRO MORALES GIMÉNEZ**

**CURSO 2013-2014**

## INDICE GENERAL

---

<b>PORTADA</b>	1
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	9
<b>1. RESUMEN</b>	10
<b>2. INTRODUCCION</b>	16
<b>3.-CARACTERIZACION O DESCRIPCION GEOLOGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	18
3.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO	22
<b>4. METODOLOGÍA</b>	25
4.1. TOMOGRAFIA SISMICA	25
4.1.1 Fundamentos generales	25
4.1.2. Inversión de los datos	28
4.2. METODO MASW	29
4.2.1 Ondas Rayleigh	36
4.2.2. Adquisición de los datos	37
4.2.3 Procesado de datos	41
4.2.3.1 Análisis espectral (p-f) de velocidades	41
4.2.3.2 Selección de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh	44
4.2.3.3 Modelado de las ondas S	45
4.3. PARÁMETROS GEOMECAÑICOS DEL SUBSUELO (CONSTANTES ELÁSTICAS)	46
4.3.1. Módulo de volumen (de incompresibilidad, K)	47
4.3.2 .Módulo de Young (E)	47
4.3.3. Módulo de cizalla (rigidez) (G)	48
4.3.4. Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )	48
4.3.5. Capacidad de carga (Bearing capacity)	49

<b>5. INSTRUMENTACION</b>	<b>50</b>
5.1. TOMOGRAFIA SÍSMICA	51
5.1.1 Adquisición de los datos	51
5.1.2 Procesado de datos	53
5.2 MÉTODO SÍSMICO MASW	54
5.2.1 Adquisición de los datos	54
5.2.2 Procesado de datos	54
5.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DEL TERRENO	55
<b>6.- RESULTADOS Y DISCUSION</b>	<b>56</b>
6.1. RESULTADOS COMPARATIVOS DE LAS TRES ZONAS	56
6.2. PARÁMETROS GEODINÁMICOS	70
<b>7.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>79</b>
<b>8.-FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION</b>	<b>84</b>
<b>9.- REFERENCIAS</b>	<b>85</b>

## INDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Localización de Mazarrón y zonas de estudio en urbanización Camposol sector B de Mazarrón. Zonas: G1; Calle Araucarias, G2; Calle Alobe, G3; Explanada paralela a calle Alobe	11
<b>Figura 2.</b> A. Línea en serie de geófonos (Landstreamer), se puede apreciar el golpeo en placa de acero para la generación de ondas Rayleigh. B. Equipo compuesto por sismógrafo y ordenador para la adquisición e inversión de datos	12
<b>Figura 3.</b> A, B; Estado de viviendas y parte de calle tras asentamientos en calle Araucarias. C; Rotura de capa asfáltica en calle Araucarias tras asentamientos	14
<b>Figura 4.</b> A, B C y D; Asentamientos con rotura de capa asfáltica, así como parte de las construcciones en calle trasera a calle Araucarias, produciendo ondulaciones de hasta medio metro de altura	15
<b>Figura 5.</b> Mapa geológico de la Región de Murcia. Rodríguez Estrella, T. (1993)	18
<b>Figura 6.</b> Mapa hidrogeológico del acuífero termal del Saladillo, Rodríguez Estrella, T. (2005)	19
<b>Figura 7.</b> Corte hidrogeológico en el acuífero del Saladillo. P: Micaesquistos (Paleozoico). T: Mármoles (Triásico). RV: Rocas volcánicas (Mioceno). M: Margas (Mioceno). Q: Gravas y arenas (Cuaternario). Rodríguez Estrella, T. (2005)	20
<b>Figura 8.</b> Ubicación de la zona de estudio en Mazarrón	23
<b>Figura 9.</b> Ubicación de las áreas de estudio, calles Araucarias (G1), Alobe (G2) y Explanada paralela a calle Alobe (G3) de urbanización Camposol sector B (Mazarrón)	24
<b>Figura 10.</b> Sección 2D obtenida para una tomografía sísmica aplicada sobre una ladera (cortesía de Intelligent Resources, Inc.)	26



- Figura 11.** Sismógrafo Compact. Adquirido por la upct 27
- Figura 12.** Diagrama esquemático con las trayectorias de onda de interés en el método sísmico de refracción ( $V_2 > V_1$ ) y los componentes básicos de un arreglo de adquisición. Tomado de [www.state.nj.us](http://www.state.nj.us). 28
- Figura 13.** Procedimiento para la obtención de perfiles 1D de velocidad de cizalla. 31
- A. Golpeo de placa de acero para generación de ondas sísmicas.
  - B. Conexión de equipo sísmico con línea de geófonos.
  - C. Carro de transporte y conexión de sismógrafo con batería y línea de geófonos
- Figura 14.** Registros de disparo. Sísmica Masw para la obtención de la  $V_s$  32
- Figura 15.** Transformada  $p, f$  y selección de la curva de dispersión 32
- Figura 16.** Perfil de velocidad de cizalla en 2D ( $V_s$  Según el método Masw) 33
- Figura 17.** Movimiento de las partículas y relación con la dirección de propagación en las ondas Rayleigh. Tomado de [www.ua.es](http://www.ua.es). 36
- Figura 18.** Landstreamer desarrollado por el Servicio Geológico Kansas. USA. (Park et al., 1999) 39
- Figura 19.** Equipo Landstreamer utilizado por la Universidad Politécnica de Cartagena. 40
- A. Línea de geófonos con vehículo de transporte.
  - B. Conexión de equipo sísmico sobre carro móvil (batería y equipo informático), con línea de geófonos.
  - C y D. Generación de onda sísmica para el equipo Landstreamer por golpeo en placa de acero
- Figura 20.** Imagen espectral resultante al aplicar la transformada  $p-f$ . Se observa la tendencia típica de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh (puntos seleccionados) 44
- Figura 21.** 50
- A: Colocación totalmente recta de la línea en serie de geófonos, así como marcado en terreno para el posterior golpeo con placa de acero y maza de 8 Kg.

B: Geófono con rosca y conexiones rápidas para colocar en línea	
<b>Figura 22.</b> Sismógrafo (DMT) adquirido por UPCT, (sin conexionado)	51
<b>Figura 23.</b> Geófonos y segmento del tendido de adquisición empleados en (Áreas G1, G2, G3), conectados entre ellos en serie	52
<b>Figura 24.</b> Zona G1, calle Araucarias	57
A. Registros de disparo. Sísmica Masw para la obtención de la $V_s$ .	
B. Sismograma obtenido para registro de disparo, tomografía sísmica $V_p$	
<b>Figura 25.</b> Zona G2, calle Alobe.	58
A. Registros de disparo. Sísmica Masw para la obtención de la $V_s$ .	
B. Sismograma obtenido para registro de disparo, Tomografía Sísmica $V_p$	
<b>Figura 26.</b> Zona G3, explanada paralela a calle Alobe.	59
C. Registros de disparo. Sísmica Masw para la obtención de la $V_s$ .	
D. Sismograma obtenido para registro de disparo, Tomografía Sísmica $V_p$	
<b>Figura 27.</b> Transformada p,f y selección de la curva de dispersión.(Zona G1, calle Araucarias)	60
<b>Figura 28.</b> Transformada p,f y selección de la curva de dispersión.(Zona G2, calle Alobe)	60
<b>Figura 29.</b> Transformada p,f y selección de la curva de dispersión.(Zona G3, explanada paralela a calle Alobe)	61
<b>Figura 30.:</b> Zona G1. Relleno sin compactar	62
<b>Figura 31.</b> Perfil de velocidad de cizalla en 2D ( $V_s$ Según el método Masw, zona G1, calle Araucarias)	64
<b>Figura 32.</b> Perfil de velocidad de cizalla en 2D ( $V_s$ Según el método Masw, zona G2, calle Alobe)	64
<b>Figura 33.</b> Perfil de velocidad de cizalla en 2D ( $V_s$ Según el método Masw, zona G3, explanada paralela a calle Alobe)	64
<b>Figura 34.</b> Columna estratigráfica C1. (Zona G1, calle Araucarias)	65
<b>Figura 35.</b> Columna estratigráfica C2. (Zona G2, calle Alobe)	66
<b>Figura 36.</b> Columna estratigráfica C3. (Zona G3, explanada paralela a calle Alobe)	67

<b>Figura 37.</b> Perfil de velocidad de ondas compresionales ( $V_p$ en m/s, mediante tomografía sísmica). Zona G1, calle Araucarias	68
<b>Figura 38.</b> Perfil de velocidad de ondas compresionales ( $V_p$ en m/s, mediante tomografía sísmica). Calle Alobe	69
<b>Figura 39.</b> Perfil de velocidad de ondas compresionales ( $V_p$ en m/s, mediante tomografía sísmica). Explanada paralela a calle Alobe	69
<b>Figura 40.</b> Sección de dispersión, Coeficiente de Poisson. Calle Araucarias (zona G1)	71
<b>Figura 41.</b> Sección de dispersión, Coeficiente de Poisson. Calle Alobe (zona G2)	72
<b>Figura 42.</b> Sección de dispersión, Coeficiente de Poisson. Explanada paralela a calle Alobe (zonaG3)	72
<b>Figura 43.</b> Sección de variación del Módulo de Young (E), calle Araucarias (zona G1)	73
<b>Figura 44.</b> Sección de variación del Módulo de Young (E), calle Alobe (zona G2)	73
<b>Figura 45.</b> Sección de variación del Módulo de Young (E), explanada paralela a calle Alobe (zona G3)	74
<b>Figura 46.</b> Sección de variación del Módulo de Cortante (G), calle Araucarias, (zonaG1)	75
<b>Figura 47.</b> Sección de variación del Módulo de Cortante (G), calle Alobe, (zona G2)	75
<b>Figura 48.</b> Sección de variación del Módulo de Cortante (G), explanada paralela a calle Alobe, (zona G3)	76
<b>Figura 49.</b> Sección de variación del Módulo de Compresibilidad (K).Calle Araucarias, (zona G1)	77
<b>Figura 50.</b> Sección de variación del Módulo de Compresibilidad (K).Calle Alobe, (zona G2)	77
<b>Figura 51.</b> Sección de variación del Módulo de Compresibilidad (K).Explanada paralela a calle Alobe, (zona G3)	78

## INDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Tipos de suelo según el Eurocódigo (EC8). (Soils type according to EC8.)	13 y 41
<b>Tabla 2.</b> Capacidades de carga a los 5m, 10m, 15m, 20m y 30m de profundidad en la zona G1	70
<b>Tabla 3.</b> Capacidades de carga a los 5m, 10m, 15m, 20m y 30m de profundidad en la zona G2	70
<b>Tabla 4.</b> Capacidades de carga a los 5m, 10m, 15m, 20m y 30m de profundidad en la zona G3	71

Agradecer a todas las personas cercanas a mí, por la ayuda, apoyo y momentos buenos que siempre son tan deseados,...GRACIAS

A mi mujer María, por darme los hijos que tengo, lo más preciado de mí vida, por el apoyo desde el primer momento, por animarme a seguir en los momentos difíciles, en fin por estar ahí en el momento que la he necesitado y cuando no también. GRACIAS

A mis hijos Rubén y María, porque los quiero con locura, porque a su manera comprenden el esfuerzo diario de sus padres, porque nos dan la vida, por ser el motivo a luchar día a día. OS QUIERO, OS QUEREMOS. GRACIAS

A mis padres Antonio y Juana, a mi hermano Juan Antonio y a mis suegros José y Juani, por la comprensión y apoyo diario. MIL GRACIAS

A todos mis cuñados, haciendo especial atención a Jose David, por todos los años que nos conocemos, los buenos momentos y por las veces que me ha echado un cable cuando me ha hecho falta. GRACIAS, GRACIAS...

A Pedro Martínez Pagán, como profesor y director de este proyecto, por darme la oportunidad de trabajar con él. MUCHAS GRACIAS.

A Jaruselsky, por la ayuda aportada en la comprensión y realización de este proyecto. SINCERAMENTE GRACIAS.

A todos los compañeros y colegas de colegio, que de una forma u otra han estado ahí. Gracias.

SINCERAMENTE GRACIAS.

## 1. RESUMEN

---

Para el cálculo de parámetros geomecánicos del terreno, pueden ser empleados los valores de las velocidades de ondas compresionales (P) y ondas de cizalla (S) mediante métodos geofísicos superficiales. Estos parámetros son fundamentales para obtener las características de las zonas en las que se procede a la realización de obras civiles, edificios, etc. Y a la minimización del riesgo sísmico en las mismas, así como de asentamientos incontrolados del terreno, estabilidad de taludes, etc.

En la gran mayoría de las obras de ingeniería civil, es de vital importancia el encontrar los parámetros necesarios para obtener el comportamiento mecánico de los materiales geotécnicos bajo distintos tipos de cargas que serán adquiridas en el transcurso de la realización de la obra. Normalmente el parámetro ha sido expresado como modulo elástico, siendo el más importante el módulo de cizalla ya que está íntimamente ligado a la rigidez de la estructura del material.

La vida útil del pavimento, así como las medidas de prevención y correctivas apropiadas de posibles deterioros y agrietamientos de tracción en la capa superficial, etc., está íntimamente relacionado con el comportamiento de tensión-deformación del sistema de pavimentos, el cual esta generalmente indicada por el módulo de cizalla.

Las bajas amplitudes del módulo de cizalla se utilizan en el diseño de las instalaciones, como bases como niveles de referencia para máquinas vibrantes para observar el estado mecánico del suelo y el potencial de licuefacción durante los temblores de tierra, así como la evaluación in situ de los depósitos difíciles de la muestra como gravas y cantos rodados (Park, 1995).

Con este fin, se llevaron a cabo campañas de adquisición de datos con el método de tomografía sísmica y el método de sísmica MASW del inglés "Multi-channel Analysis of Surface Waves, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales" en varias calles de la urbanización Camposol sector B de la población de Mazarrón, siendo la calle Araucarias (G1), en la que se realizó la primera campaña de mediciones y una de las más afectadas debido al asentamiento del terreno, seguida de la calle Alobe, la cual se encuentra en perfecto estado,

finalmente se realizó una tercera campaña en una explanada paralela a la calle Alobe en un estado aparentemente bueno, sin presencia de asentamientos.

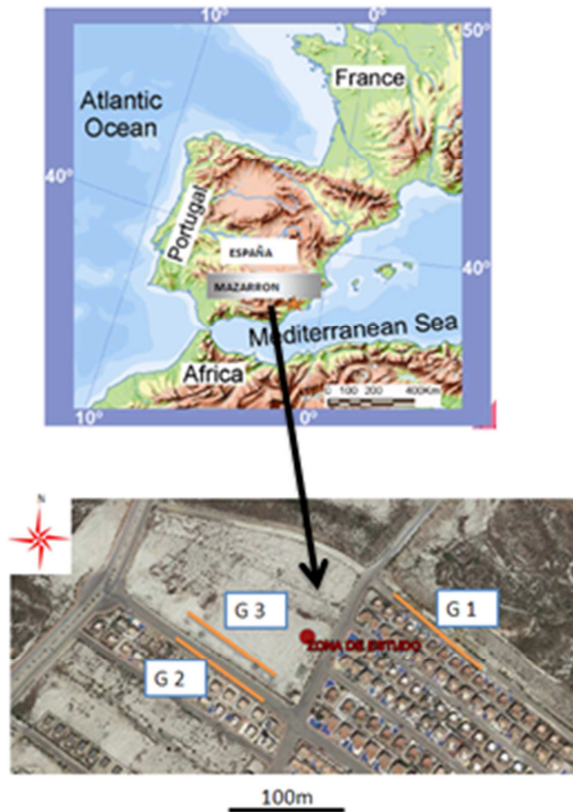


Figura 1. Localización de Mazarrón y zonas de estudio en urbanización Camposol sector B de Mazarrón.

Zonas: G1; Calle Araucarias, G2; Calle Alobe, G3; Explanada paralela a calle Alobe.

Ésta última campaña se realizó para tener una comparación de resultados y así ver los efectos del asfaltado sobre los datos obtenidos ya que dicha zona fue medida en ausencia de dicha capa.

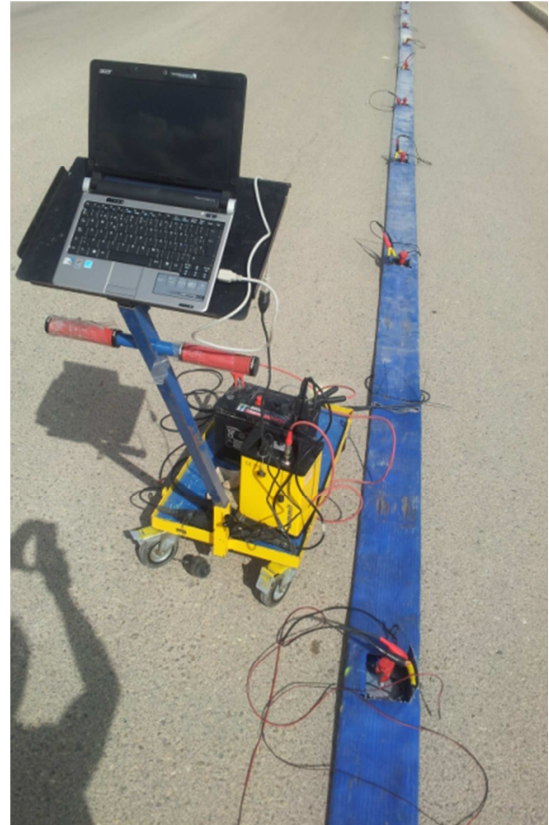
Estas campañas de mediciones con los dos métodos comentados, nos permitieron obtener los perfiles de velocidades sísmicas (P y S) necesarios para clasificar geomecánicamente el terreno de las zonas de estudio. En la adquisición de datos sísmicos de refracción para ondas compresionales (P) se evidenciaron algunas limitaciones importantes respecto a la geometría y resultados del estudio, principalmente relacionadas a la profundidad de investigación y al elevado nivel de ruido sísmico del ambiente urbano.



Las mediciones se realizaron con el equipo compuesto por 24 geófonos en serie, un geófono de activación, así como un sismógrafo conectado a un ordenador para poder realizar la inversión de datos con el correspondiente programa.



A



B

*Figura 2.*

*A: Línea en serie de geófonos (Landstreamer), se puede apreciar el golpeo en placa de acero para la generación de ondas Rayleigh.*

*B: Equipo compuesto por sismógrafo y ordenador para la adquisición e inversión de datos.*

Para la aplicación del método MASW y tomografía sísmica se usó como fuente activa un martillo (maza de 8 kg), siendo apropiado para el ambiente investigado en cuanto a los perfiles de ondas de corte Vs. Los perfiles y valores de velocidad obtenidos, así como los coeficientes de Poisson calculados, se encuentran en el rango correspondiente a una serie detrítica margo-arenosa, lo cual concuerda bien con la geología superficial de la zona, quedando probado que



la obtención de perfiles de ondas P y S son un medio práctico y rápido para calcular los parámetros dinámicos de un área.

Como resultado con el método MASW se observó en calle Araucarias una  $V_s$  relativamente pequeña (180m/s en los primeros 5m), con una capacidad de carga de aproximadamente 45,6 kPa., lo cual corresponde a una serie de suelos muy blandos, concordando con el lugar, ya que en el mismo se observan aportes de relleno sin el correspondiente tratamiento. Aumentando considerablemente la  $V_s$  a partir de esta profundidad, 200m/s a partir de los 5m y 500m/s en 30m (con un suelo del tipo rígido y muy denso respectivamente), según el Eurocódigo EC8 y con el considerable aumento de la capacidad de carga, pasando de 104,8 KPa a partir de los cinco primeros metros hasta llegar a alcanzar los 228 KPa a los 30m. Empleando la fórmula según Tezcan et. Al, 2006:

$$= 2,4(10^{-4})$$

Tabla 1. Tipos de suelo según el Eurocódigo (EC8). (Soils type according to EC8.)

Tipo de suelo (EC8)	Descripción	$V_s^{30}$ (m/s)
A	Roca dura	>800
B	Suelo muy denso o roca blanda	360-800*
C	Suelos rígidos	180-360
D	Suelos medios a blandos	<180

\* Con el objetivo de una mejor clasificación se ha optado por dividir en dos partes el suelo tipo B en suelos tipo B1 (500-800 m/s) y B2 (360-500 m/s) (Navarro et al., 2013)

En las dos siguientes campañas llevadas a cabo en calle Alobe y explanada paralela a calle Alobe, se observó una correlación entre ambas, verificando de esta forma que la capa asfáltica no influye en los datos obtenidos.

Se obtuvo un progresivo aumento de  $V_s$  en función a la profundidad, pudiéndose comprobar que en los 10 m primeros se tiene una  $V_s$  entre 420 y 480

m/s, siendo un suelo muy denso, con una capacidad portante por encima de los 220 KPa.

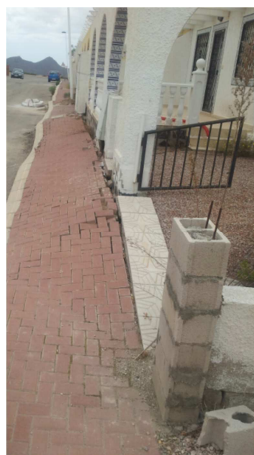
Esto demuestra la correlación con el lugar, ya que en el mismo no se aprecian alteraciones tanto de suelo como en las edificaciones.

Como conclusiones se puede afirmar la eficacia de estos dos métodos (tomografía sísmica para  $V_p$  y el método Masw para  $V_s$ ), para la rápida adquisición de datos y la obtención de los parámetros geomecánicos en ambientes urbanos. Dando como resultado un muestreo in situ de las condiciones del subsuelo, de forma que no pueden experimentar alteración alguna que puedan variar los resultados.

Se ha demostrado la existencia de rellenos sin el correspondiente tratado de compactación en los cinco primeros metros de profundidad en la calle Araucarias, a diferencia de las dos siguientes campañas. Recomendando un desmontado de esta primera capa de relleno, para posteriormente realizar aportes con zahorras artificiales compactadas en pequeñas tongadas para alcanzar la capacidad portante necesaria, así como una densa malla de micro pilotes en las cimentaciones de los edificios más afectados, hasta sobrepasar la capa de rellenos antrópicos.



A



B



C

*Figura 3. A, B; Estado de viviendas y parte de calle tras asentamientos en calle Araucarias.*

*C; Rotura de capa asfáltica en calle Araucarias tras asentamientos.*



A



B



C



D

*Figura 4. A, B, C y D; Asentamientos con rotura de capa asfáltica, así como parte de las construcciones en calle trasera a calle Araucarias, produciendo ondulaciones de hasta medio metro de altura.*

## 2. INTRODUCCIÓN

---

Los parámetros geomecánicos del subsuelo representan un elemento fundamental en los estudios geotécnicos y geofísicos aplicados en la ingeniería civil y en los estudios de microzonificación sísmica. Estos métodos geofísicos tienen su base en la determinación de las características y respuestas locales del suelo ante la propagación de las ondas sísmicas. Los desarrollos teóricos logrados en el área de la geofísica, gracias al avance conseguido en las últimas décadas en la captación de las ondas superficiales y en el desarrollo de la capacidad de los ordenadores para el procesamiento de los datos han extendido el uso de estos dos métodos (tomografía sísmica y método sísmico Masw) para la cuantificación y caracterización de los parámetros mecánicos asociados al terreno.

Los ensayos geotécnicos que se aplican en la actualidad, ya sea en laboratorio o en campo, pueden ser complementados por técnicas geofísicas que aportan rapidez en la delimitación de grandes zonas de estudios, pero sobre todo se destaca de estas técnicas geofísicas su carácter no invasivo, lo cual es muy importante cuando se hacen este tipo de estudio en zonas urbanas.

Para la realización de este estudio de investigación se van a aplicar dos métodos de prospección sísmica, el primero es el método de tomografía sísmica, el cual permitirá obtener perfiles de velocidad de ondas compresionales ( $V_p$ ) y el método MASW, que permitirá la investigación de las ondas de cizalla ( $S$ ), con el objetivo de obtener los perfiles de velocidades de cizalla ( $V_s$ ) para el área de estudio. Estos perfiles obtenidos mediante estas técnicas geofísicas permitirán la derivación de los parámetros dinámicos superficiales del subsuelo. El procedimiento llevado a cabo consiste en investigar dos zonas diferentes de una misma población, la primera donde los asentamientos puntuales han ocasionado graves daños sobre la casas que se encuentran en esta calle (Calle Araucarias) y otra calle (Calle Alobe) donde no se han presentado ningún tipo de asentamiento a pesar de estar a menos de 100 m de distancia de la que si se vio afectada por los asentamientos. Además se ha hecho un tercer perfil sobre una explanada paralela a la Calle Alobe que está sin asfaltar para cuantificar e identificar las posibles

diferencias que podría aportar estas técnicas geofísicas al aplicarlas sobre el asfalto, sobre todo en la tomografía sísmica, que podría tener efectos asociados a la presencia de esta capa, en la alta velocidad adquirida en las volumétricas o compresionales en las primeras llegadas de las ondas superficiales.

Para la configuración inicial de la adquisición de las ondas y el procesado de los sismogramas obtenidos en campo a través de la tomografía sísmica se ha empleado el paquete informático *Rayfract* y para el método MASW se ha empleado el programa Surfseis 3.0, con el principal objetivo de poder realizar una inversión de los datos obtenidos y así clasificar las velocidades  $V_p$  y  $V_s$  respectivamente.

El estudio también ha proporcionado importantes conclusiones acerca del potencial y viabilidad de la aplicación de campañas de tomografía sísmica y del método MASW en un ambiente urbano, con elevado nivel de ruido.

El proyecto se llevó a cabo bajo la dirección del profesor Pedro Martínez Pagán perteneciente al Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica de la Universidad Politécnica de Cartagena, donde se ha analizado la idoneidad de usar conjuntamente la técnica de tomografía sísmica y la técnica Masw para obtener, de forma indirecta por medio de los valores  $V_p$  y  $V_s$ , los parámetros geomecánicos característicos de los materiales que conforman el subsuelo. Estos parámetros son fundamentales en estudios y trabajos de obra civil relacionados con problemas de asentamientos, cimentaciones, capacidad resistente de los suelos, etc.

### 3. DESCRIPCION GEOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La región de Murcia se encuentra ubicada en el sureste de la península ibérica, entre las coordenadas 37° 23'; 38° 45' Norte y 0° 41'; 2° 21' Oeste, referidas al meridiano de Greenwich. En el caso de la zona de estudio, estas coordenadas son 37° 38' 10'' Norte y 1° 23' 10'' Oeste.

Mediante el mapa Geológico de la región de Murcia según la figura 5, zona de Mazarrón, se obtuvo la ubicación del lugar, correspondiente a Cañada Honda. Este lugar está compuesto por materiales Postorogénicos de rocas sedimentarias, con potentes formaciones margosas miocénicas según Rodríguez Estrella, T. (2005).

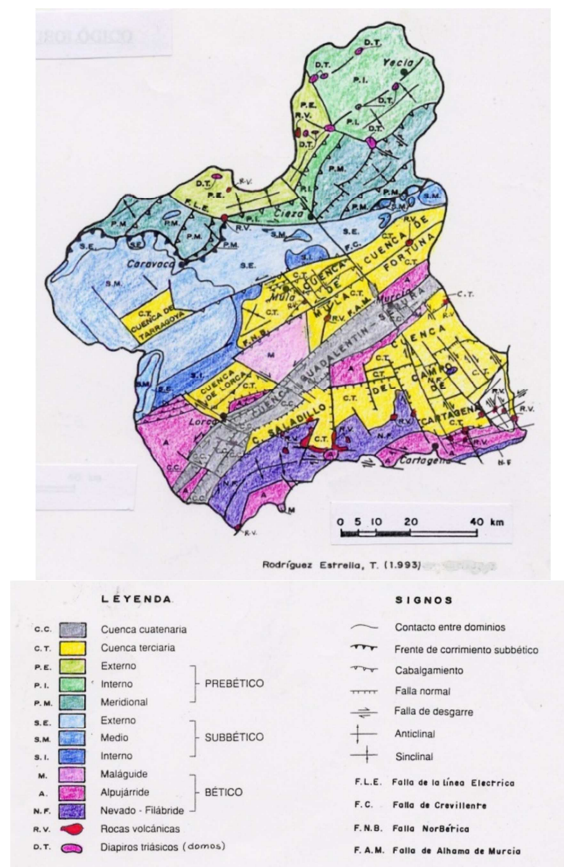


Figura 5. Mapa geológico de la Región de Murcia. Rodríguez Estrella, T. (1993)



Por otro lado, en la Región de Murcia existe un vulcanismo relativamente reciente, que está relacionado claramente con las estructuras neotectónicas, el vulcanismo está asociado a la sedimentación de cuencas postorogénicas (figura 5), como lo prueba el hecho de encontrarse las rocas efusivas interestratificadas en las potentes formaciones margosas miocénicas de la Cuenca de Mazarrón, (pueden llegar a alcanzar los 2.500 m), que han actuado como aislantes y que son de origen postorogénico y no han sufrido grandes plegamientos.

Con el fin de conocer el espesor de los materiales en esta zona, ENADIMSA-IGME-CARM (1985) llevó a cabo una campaña de Geofísica tipo eléctrico de 42 SEV con una alta penetración ( $AB=2.500$ ), distribuidos en 5 perfiles geoelectrónicos. La situación de los mismos puede verse en la figura 6.

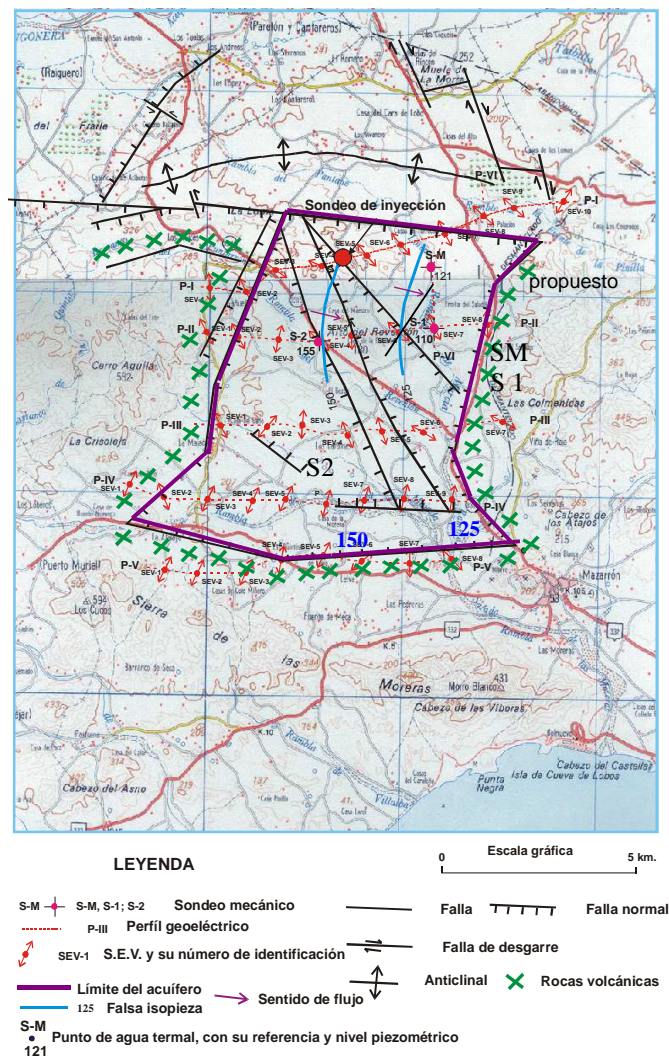
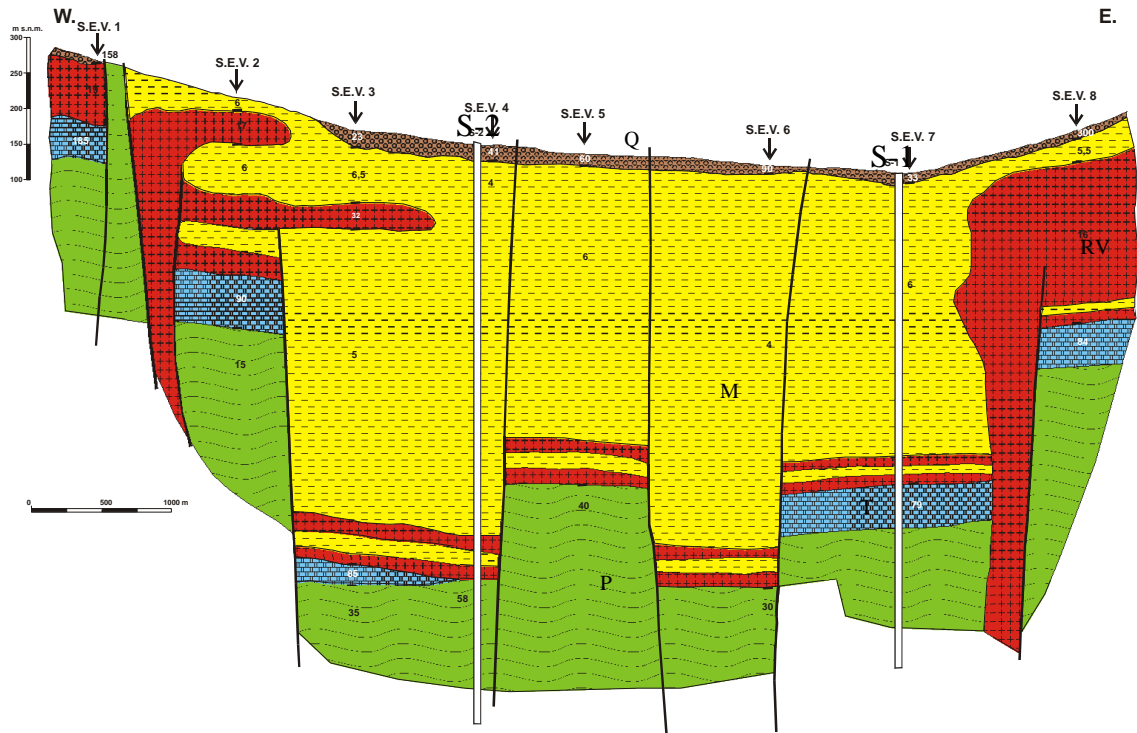


Figura 6. Mapa hidrogeológico del acuífero termal del Saladillo, Rodríguez Estrella, T. (2005).



*Figura 7. Corte hidrogeológico en el acuífero del Saladillo. P: Micaesquistos (Paleozoico). T: Mármoles (Triásico). RV: Rocas volcánicas (Mioceno). M: Margas (Mioceno). Q: Gravas y arenas (Cuaternario). Rodríguez Estrella, T. (2005).*

## Estructura

Considerando la cartografía geológica realizada y la Geofísica (figura 6), se puede decir lo siguiente:

- a) La estructura de la depresión de esta zona es la de una fosa tectónica condicionada por fallas normales, por las que se han inyectado las rocas volcánicas.
- b) En el interior de la misma existe un pequeño horst, de dirección N 160 E, que en superficie coincide con un afloramiento de Plio-Cuaternario, que ocupa las cimas de unas pequeñas lomas. También existen otras fallas menores, como la de dirección W-E que condiciona la Rambla de Agua Dulce de Baltasar.
- c) En el Norte de dicha depresión existe un anticlinal, con núcleo en margas del Mioceno superior. Tanto en el flanco septentrional como en el meridional, afloran caliches con margas rojas del Plio-Cuaternario, que han



sufrido una neotectónica (buzamientos de hasta 5° y están afectados por fallas normales, de desgarre, incluso inversas (próximo al Paretón).

#### Sondeo del "Reventón"(S-2)

Fue también realizado por ENADIMSA-IGME-CARM, (1985). Se atravesaron:

- 24 m de conglomerado poligénico y heterométrico, pardo-rojizo. Cuaternario.
- 522 m de margas y margocalizas grises. Mioceno superior.
- 71 m de margas y rocas volcánicas interestratificadas. Mioceno superior.
- 93 m de micaesquistos negros grafitosos con cuarzo. Paleozoico.
- En este sondeo no se tocaron los mármoles del Triásico, por causas erosivas.
- Debido a que no se entubó, se hundió, y hoy día ya no existe.

#### Sondeo "Manoli" (S-M)

Según el propietario, se cortaron los siguientes materiales, de techo a muro:

- 10 m de conglomerado poligénico y heterométrico pardo-rojizo. Cuaternario.
- 426 m de margas y margocalizas grises. Mioceno superior.
- 24 m de margas y rocas volcánicas interestratificadas. Mioceno superior.
- 62 m de mármoles, cuarcitas y esquistos. Triásico.
- Micaesquistos negros grafitosos con cuarzo y yeso. Paleozoico.

Estos materiales tiene una disposición subhorizontal, y cuantitativamente se puede decir que aproximadamente un cuarto, lo forman las pertenecientes al cuaternario, siendo el resto Neógeno, desde el Tortoniense, (Mioceno superior) hasta el Tabanense (parte inferior del Plioceno Inferior). Estos materiales se sitúan

en una depresión que se extiende de Este a Oeste en la zona meridional de la Hoja, y también en zonas próximas a la costa. Está datado como Terciario, Neógeno, de edad Messiniense inferior (Margas, Arenas y Areniscas). El rasgo más resaltante en la zona de calle Araucarias es la presencia de un relleno sedimentario de espesor variable, compuesto principalmente por Margas que alcanza los 5 m de profundidad.

### **3.1 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO**

El estudio se llevó a cabo en varias calles de la urbanización Campo sol de la localidad de Mazarrón, provincia de Murcia. Dichas calles pertenecientes al sector B de dicha urbanización se denominan calle Araucarias (G1) y calle Alobe (G2) respectivamente, así como una tercera zona que será identificada en el proyecto como explanada paralela a calle Alobe (G3), por encontrarse próxima y en este sentido a dicha calle. La ubicación de estas zonas se muestra en la Figura8.

Aplicación de técnicas sísmicas como herramienta para la obtención de parámetros geomecánicos del terreno en la urbanización Camposol, (Mazarrón)

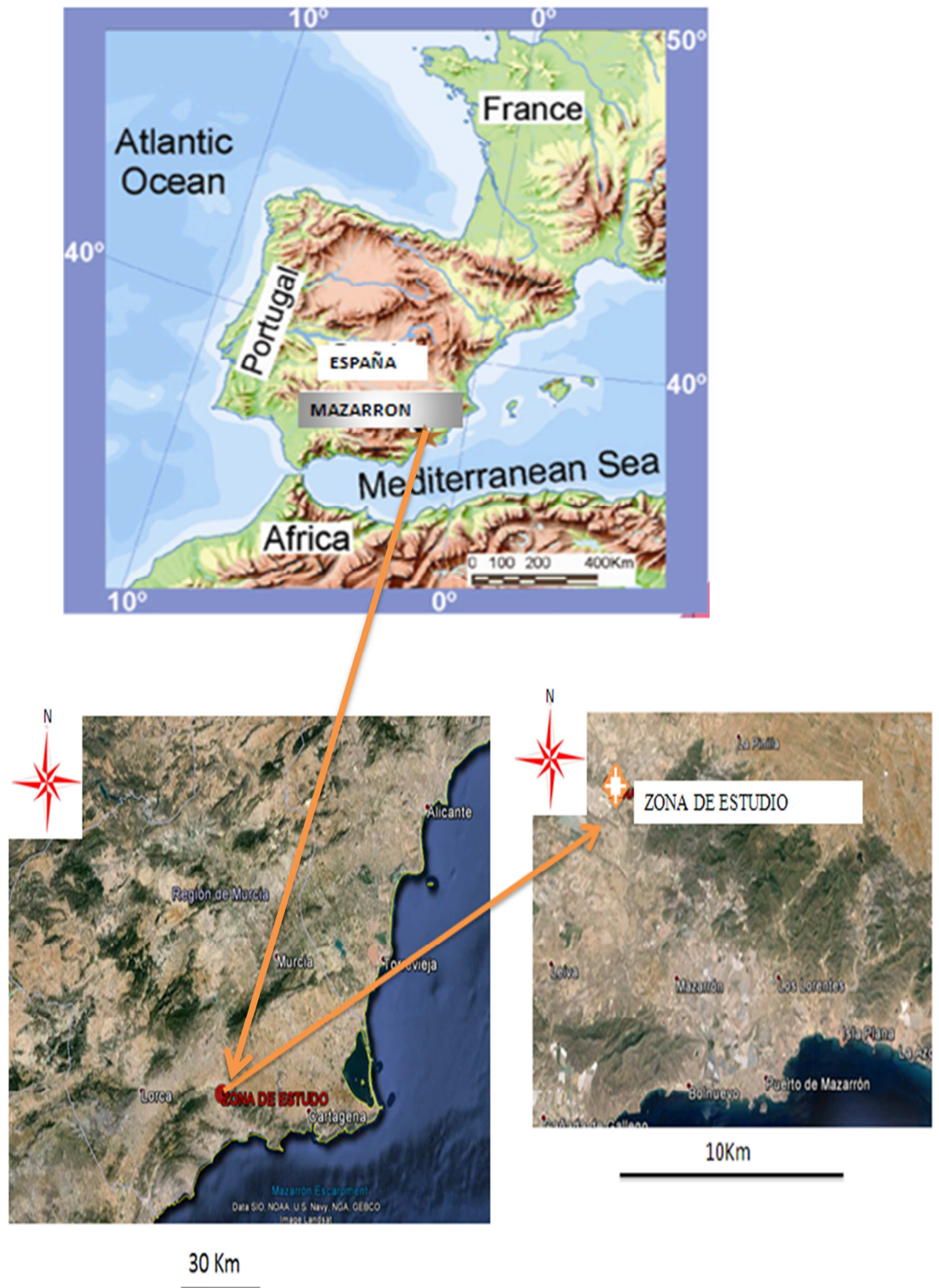
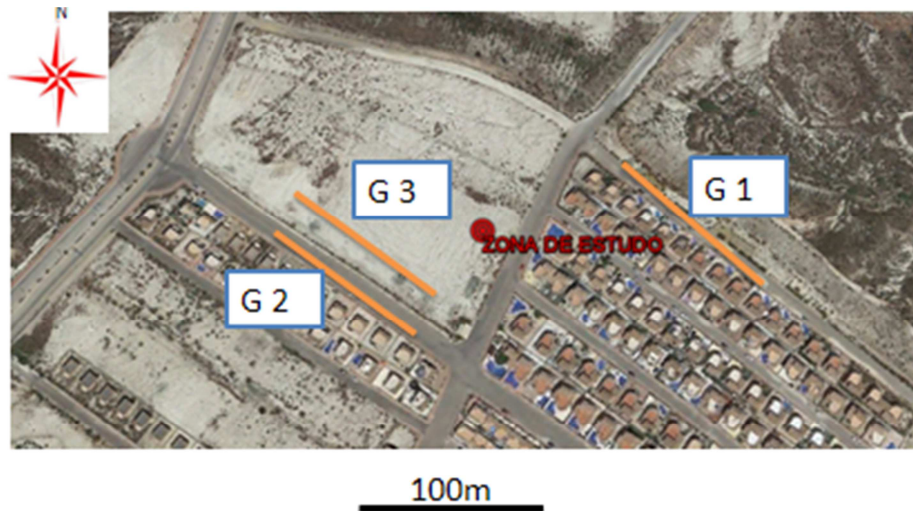


Figura 8. Ubicación de la zona de estudio en Mazarrón.



*Figura 9. Ubicación de las áreas de estudio, calles Araucarias (G1), Alobe (G2) y Explanada paralela a calle Alobe (G3) de urbanización Camposol sector B (Mazarrón).*

Estas zonas están afectadas, en mayor o menor medida, por las condiciones normales de un ambiente urbano o núcleo poblacional, tales como circulación de vehículos, paso de peatones y maquinarias, así como trabajos viales y de construcción. Todos estos elementos forman una fuente permanente de ruido sísmico, resultando positivo para la aplicación del método sísmico MASW, ya que la grabación de dicho ruido es el principio fundamental y práctico del método (ver Marco Teórico). Por el contrario, ese mismo ruido, limita radicalmente el potencial del método de tomografía sísmica. Como consecuencia, se dificulta considerablemente la identificación de la señal (primeras llegadas de las ondas compresionales,  $V_p$ ) para largos tendidos e incluso imposible en algunos casos, por lo que las profundidades de investigación alcanzadas también se ven afectadas y limitadas.

Destacar que en la zona denominada calle Araucarias (zona G1), se han producido unos fuertes asentamientos del terreno, al contrario de las dos siguientes zonas (G2 y G3), calle Alobe y explanada paralela a calle Alobe respectivamente.

## 4. METODOLOGÍA.

---

### 4.1 TOMOGRAFÍA SÍSMICA

#### 4.1.1 Fundamentos generales

Esta técnica se basa en los mismos principios matemáticos empleados en el sector de la medicina para el desarrollo de la imagen 3D de los rayos X con el escáner CAT (del inglés, "Computed Axial tomography").

Según Plata (1995), la tomografía es una técnica que permite el estudio de las propiedades físicas en el interior de un cuerpo, mediante mediciones realizadas en la superficie de su contorno. La tomografía sísmica emplea los tiempos de trayectoria de las primeras llegadas como datos de partida.

La sección sísmica obtenida es por medio de un proceso iterativo, la minimización de la diferencia entre los tiempos de trayecto observados en campo y los obtenidos a través de modelo inicial, empleando un trazado sintético de trayectorias. Para ello se deberán realizar cinco pasos: (1) picado de las primeras llegadas, (2) trazado de las trayectorias sísmicas, a partir de un modelo de velocidades del subsuelo, (3) segmentación de las trayectorias dentro de cada una de las celdas en las que se ha dividido el modelo de velocidad, (4) cálculo de las diferencias entre los tiempos observados y calculados para cada rayo sísmico, (5) Si las diferencias de tiempo son superiores a un valor establecido como error máximo admitido y que sirve para interrumpir el proceso de iteración, se deberá modificar el modelo mediante algoritmos matemáticos.

La tomografía sísmica contempla la estimación de la velocidad o su inversa, la lentitud por la comodidad de los cálculos. Esta información se puede presentar en secciones 2D, o 3D de velocidad (según figura 10).

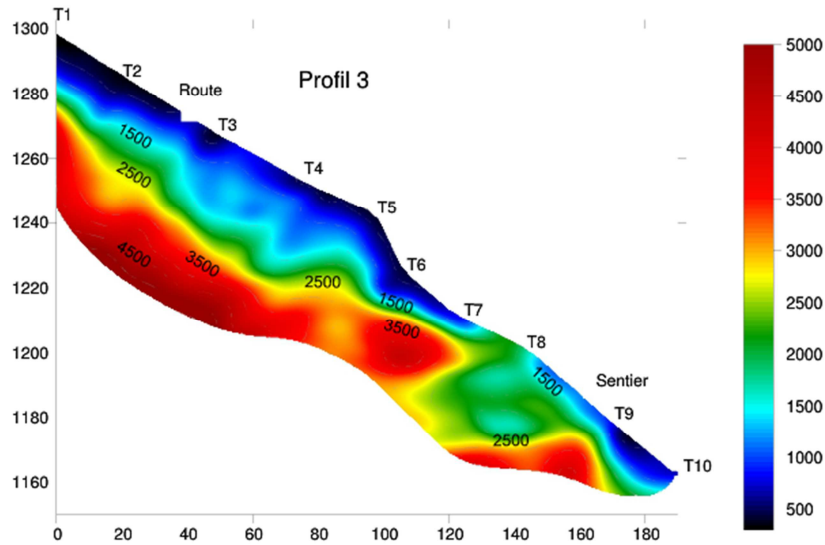


Figura 10. Sección 2D obtenida para una tomografía sísmica aplicada sobre una ladera (cortesía de Intelligent Resources, Inc.).

La tomografía sísmica es muy adecuada para la obtención de la información de las capas más superficiales del terreno, a unas pocas decenas de metros de profundidad. Esto disminuirá el número de sondeos necesarios para determinar las características geológicas de las capas más superficiales (de P. Martínez Pagán. Prospección Geofísica - 2. Universidad Politécnica de Cartagena 2008)

El principio fundamental del método de tomografía sísmica se basa en la medición de los tiempos de viaje de ondas sísmicas generadas por una fuente impulsiva en la superficie del subsuelo (o cercana a ella) y que son refractadas en las interfaces entre medios (refractores) con propiedades físicas (*i.e.* impedancias acústicas) diferentes. La tomografía sísmica es un método geofísico similar a la sísmica de refracción tradicional, la cual presenta como ventajas principales su grado de detalle de los modelos, presencia de capas de baja velocidad y que los fuertes gradientes laterales o los elevados buzamientos no son limitaciones.

La tomografía sísmica hace uso de algoritmos matemáticos de inversión (diferencia entre tiempo de recorrido de ondas P observado y teórico). Para obtener el modelo 2D de valores de velocidad  $V_p$  del subsuelo. El proceso de inversión es un proceso iterativo, en el que un modelo inicial se actualiza hasta dar



lugar al modelo final. El análisis de dichos tiempos de viaje, bajo ciertas hipótesis definidas y siguiendo las leyes de la propagación de ondas, permite en principio obtener un perfil en profundidad de la distribución geométrica de los diferentes refractores, con las correspondientes velocidades a las cuales la onda sísmica se propaga a través de ellos (Redpath, 1973).

La fuente a emplear puede ser un martillo, una fuente de caída de peso o cargas explosivas. El objetivo en todos los casos es generar un pulso de ondas compresionales que será detectado en la superficie, tras viajar en profundidad y refractarse en los diferentes estratos del subsuelo, por un dispositivo lineal de receptores (geófonos) ubicados a distancias conocidas que transmitirán la señal eléctrica generada por las vibraciones del subsuelo hasta un equipo de grabación (sismógrafo),



*Figura 11. Sismógrafo Compact. Adquirido por la upct.*

donde ésta será digitalizada y guardada para su posterior análisis e interpretación (Figura 11). Los datos adquiridos serán entonces sismogramas de los cuales pueden interpretarse los tiempos de tránsito (de las ondas compresionales) en función de la distancia entre los receptores. Esta información debe ser procesada e interpretada para poder obtener la sección de velocidades del subsuelo.

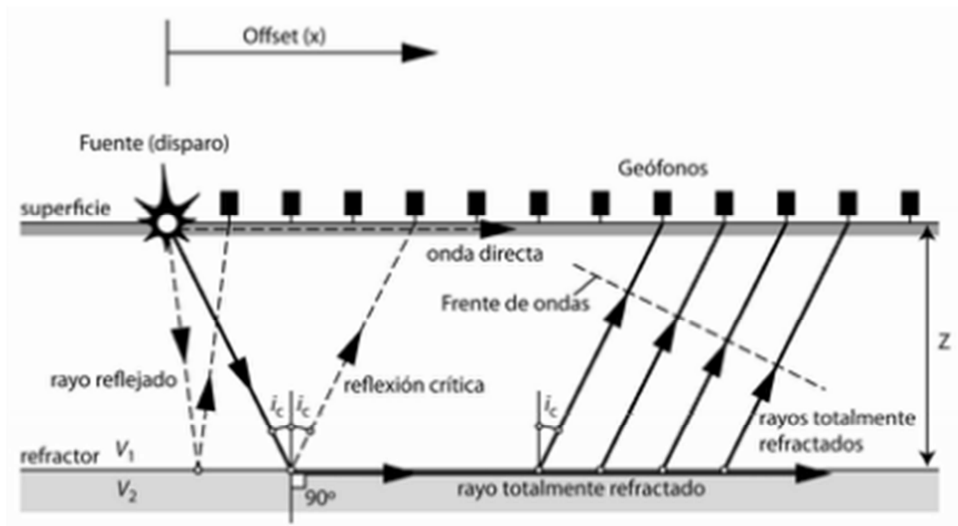


Figura 12. Diagrama esquemático con las trayectorias de onda de interés en el método sísmico de refracción ( $V_2 > V_1$ ) y los componentes básicos de un arreglo de adquisición. Extraído de P. Martínez Pagán . Prospección Geofísica - 2. Universidad Politécnica de Cartagena 2008.

#### 4.1.2 Inversión de los datos

Los tiempos de viajes de las ondas compresionales (P) seleccionados a partir de los registros de campo deben ser procesados y transformados (invertidos) para poder obtener los perfiles de velocidades sísmicas en función de la posición en el subsuelo, los cuales constituyen el producto final de la tomografía sísmica. Para lograr esto se han desarrollado varios métodos que se basan en las leyes físicas que rigen la propagación del movimiento ondulatorio a través del subsuelo y que además están supeditados a diferentes hipótesis teóricas y suposiciones en cuanto a las geometrías de los diferentes estratos y a sus características físicas (Palmer, 1981; Redpath, 1973).

Pudiéndose realizar el cálculo con el programa informático Surfseis 3 para la inversión de los datos.



## 4.2 MÉTODO MASW

Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).

El método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, conocido por sus siglas como MASW (del inglés, “Multichannel Analysis of Surface Waves method”), fue desarrollado inicialmente por Park et al. (1999a,b) y Xia et al. (1999). Este método se ha convertido en una herramienta alternativa y efectiva para la obtención de relaciones satisfactorias entre la velocidad de ondas S ( $V_s$ ) y la geología local (p.e. Martínez-Pagán et al., 2012, 2013).

El método MASW se compone de tres fases:

1. Adquisición de altas frecuencias ( $\geq 2$  Hz);
2. Creación de algoritmos eficientes y precisos, organizados en una secuencia de procesamiento de datos básicos diseñada para extraer las curvas de dispersión de las ondas Rayleigh;
3. Desarrollo de algoritmos de inversión estable y eficiente para obtener los perfiles de velocidad de las ondas de cizalla (Kansas Geological Survey (KGS), Park C.B.2001).

La velocidad media de las ondas de cizalla en los primeros 30 m ( $VS_{30}$ ) ha sido adoptada en varios códigos sísmicos (p.e. NEHRP-94, NCSE-02, Eurocódigo-8) como un parámetro representativo de la respuesta sísmica del suelo. Estudios recientes (p.e. Alcalá et al., 2006, 2014; Navarro et al., 2008, 2010, 2013; Martínez et al., 2012, 2013), han demostrado que la clasificación geológica del suelo así como sus valores  $VS_{30}$  son de vital importancia para la construcción de mapas de microzonificación y obtención de parámetros geomecánicos del subsuelo en las zonas urbanas.

El tratamiento de los datos ha consistido básicamente en identificar para cada punto de disparo, en este caso punto de vibración, la curva de dispersión para el modo fundamental de las ondas Rayleigh. Una vez obtenidas todas las curvas de dispersión pertenecientes a un mismo perfil MASW se las somete de forma individual a un proceso matemático de inversión con el fin de obtener los perfiles  $V_s$  en una dimensión (1D). Tras esto, con todos los perfiles 1D de  $V_s$  se elaboran

las secciones sísmicas 2D de valores de velocidad de las ondas de cizalla superficiales correspondientes a cada uno de los perfiles MASW.

El método MASW puede encontrar varios tipos de aplicaciones en la ingeniería civil, ya que es un método rápido para evaluar sistemas de pavimentos en forma continua y para determinar anomalías en zonas subterráneas, tales como huecos o zonas débiles en donde se pretende construir. Al hacer un estudio de manera continua, se obtiene la estructura del subsuelo la cual puede ser extrapolada para mostrar el perfil de las ondas de cizalla ( $V_s$ ) (Park, 1995).

Una de las aplicaciones más importante del método MASW es la obtención de  $V_s$  en todo tipo de ambientes, y que con  $V_p$  mediante el método anterior (tomografía sísmica), se adquiere el coeficiente de Poisson  $\nu$  para zonas superficiales, el cual representa uno de los parámetros claves en la mayoría de los proyectos geotécnicos. Este está usualmente asociado con la integridad de los materiales. Por lo tanto un mapa de distribución de  $\nu$  de dos dimensiones (Xia et al., 2000) tendría un valor inestimable (Ivanov et al., 2000).

Sísmicamente,  $\nu$  puede ser determinada si la velocidad de ondas  $P$ , llamada  $V_p$  y la velocidad de ondas  $S$ ,  $V_s$ , son conocidas. La expresión matemática que define este concepto lo demuestra.

$$\nu = \frac{\frac{(V_p)^2}{(V_s)^2} - 2}{\frac{2(V_p)^2}{(V_s)^2} - 2} \quad (1)$$

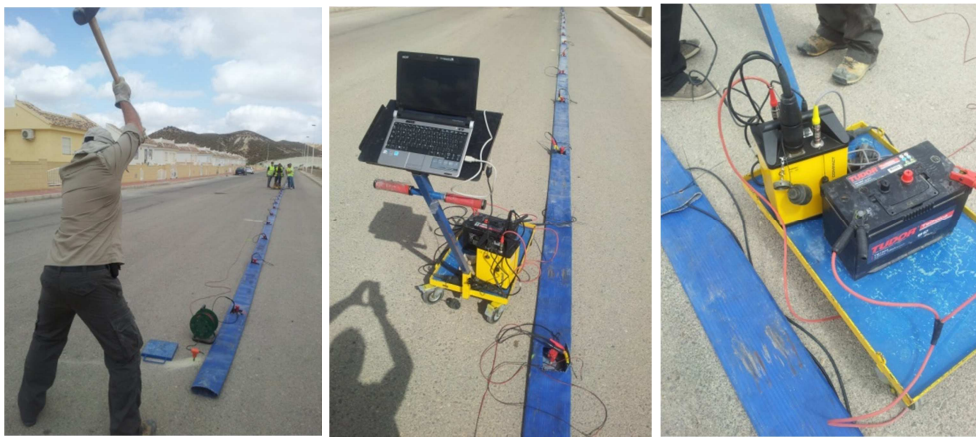
Con la evolución y desarrollo del método MASW, (Park et al., 2001) adquiere un planteamiento eficaz para evaluar y obtener la rigidez del suelo. Es un método no destructivo, robusto en su control durante la fase de adquisición y procesado de datos.

El método MASW ha sido aplicado en diferentes zonas para la solución de diversos problemas, tales como: caracterización sísmica de pavimentos, estudios sobre el coeficiente de Poisson, como se indicó anteriormente, investigación sísmica de los sedimentos en el fondo del mar, cartografía del lecho rocoso, detección de características de disolución y es aplicado a varios proyectos para producir mapas de velocidades de cizalla en 1-D y 2-D. (Ivanov et al., 2001),

incluso se ha utilizado en la detección de bombas caseras enterradas y en la detección de túneles destinados al tráfico ilegal de personas y drogas en la frontera de México con Estados Unidos.

El proceso para obtener estos perfiles se realiza en tres pasos, como se ha mencionado anteriormente:

### 1. Adquisición de las ondas superficiales.



A

B

C

*Figura 13. Procedimiento para la obtención de perfiles 1D de velocidad de cizalla.*

*A: Golpeo de placa de acero para generación de ondas sísmicas.*

*B: Conexión de equipo sísmico con línea de geófonos.*

*C: Carro de transporte y conexión de sismógrafo con batería y línea de geófonos.*

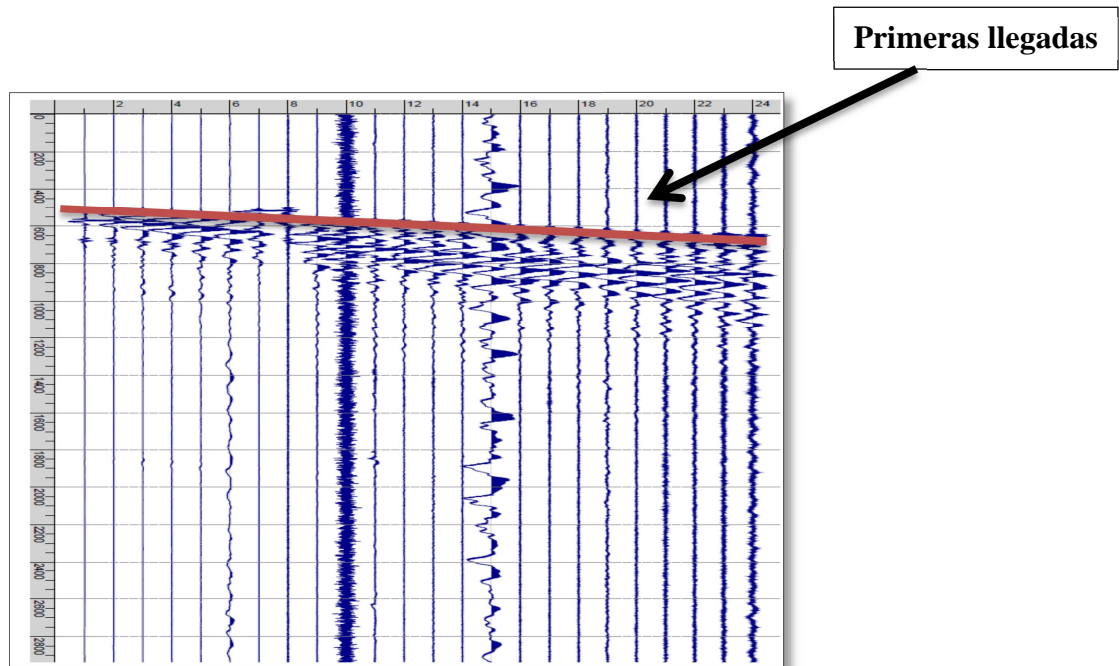


Figura 14. Registros de disparo. Sísmica Masw para la obtención de la  $V_s$ .

## 2. Construcción de la curva de dispersión.

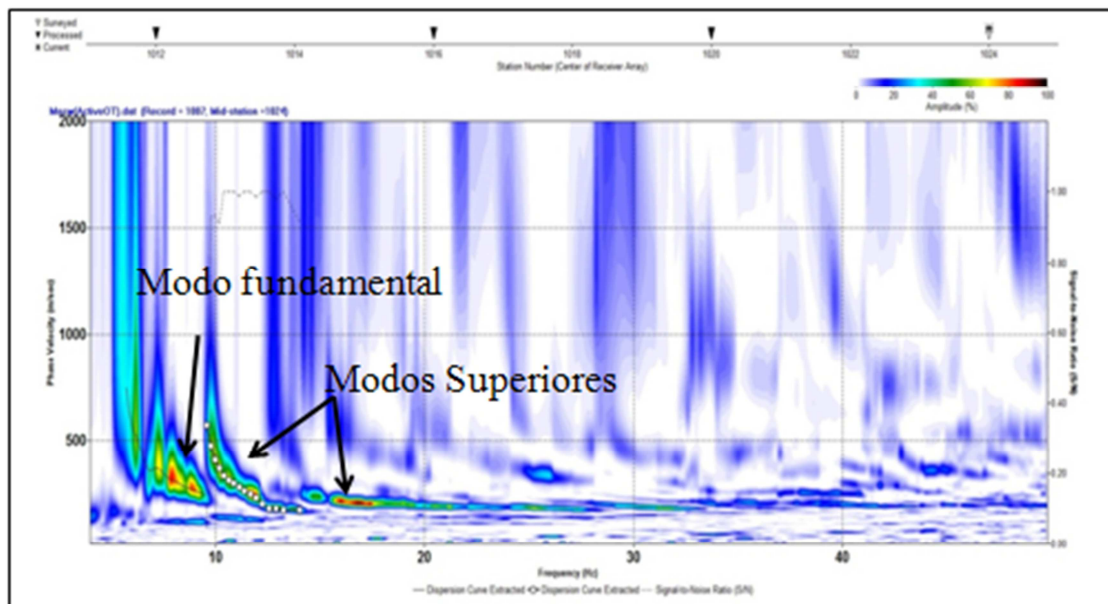


Figura 15. Transformada  $p,f$  y selección de la curva de dispersión.

### 3. Inversión de la curva de dispersión.

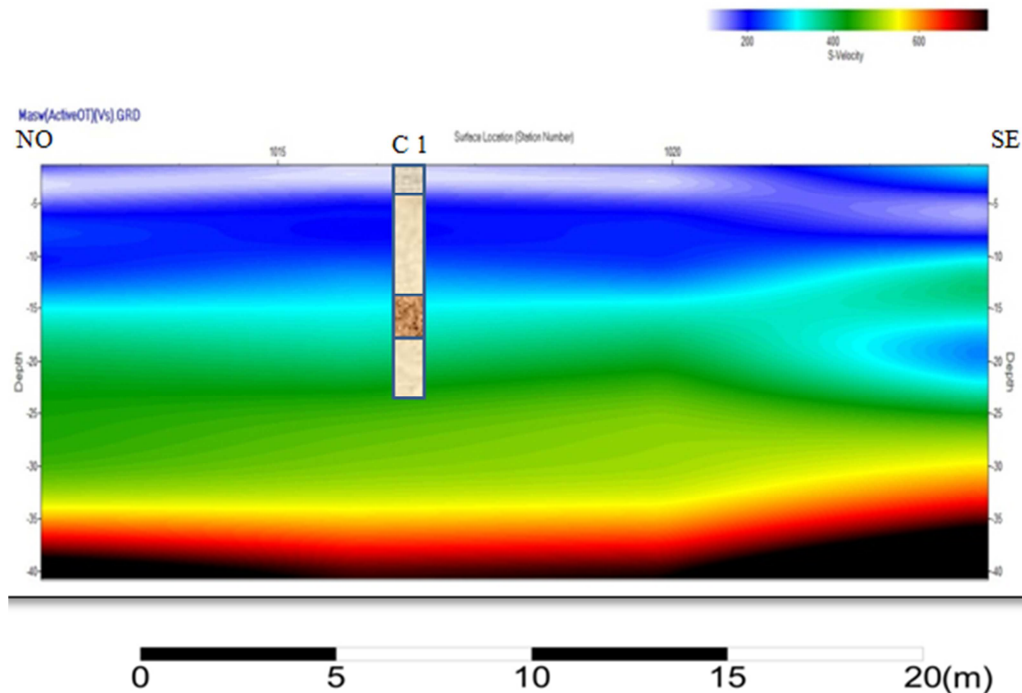


Figura 16. Perfil de velocidad de cizalla en 2D ( $V_s$  Según el método Masw).

Ivanov et al. (2001) también describe el método de una manera muy similar, definiéndolo como sigue: “del registro del golpeo se extrae la curva de dispersión del modo fundamental, pudiéndose presentar modos superiores, estos modos son ampliamente descritos por Xia et al. (2003) (Figura 15), después la curva de dispersión extraída se la somete a un proceso de inversión que proporciona una sección vertical de velocidad de cizalla”.

Las ondas Rayleigh proporcionan diferentes frecuencias para una misma velocidad de onda, siendo conocidas como modos y caracterizadas por sus diferentes números de planos nodales horizontales, es decir, que más de una velocidad de fase puede estar asociada a una frecuencia dada de onda Rayleigh ya que estas ondas pueden viajar a velocidades diferentes para una frecuencia, de manera que se pueden presentar distintos modos, conociendo como modo fundamental el que está en el rango de menor velocidad y modos superiores los que aparecen en el rango de mayor velocidad (Figura 15) (Ivanov et al., 2001).

Estos modos superiores son independientes de la velocidad de fase del modo fundamental y se presentan bajo condiciones de frecuencia determinada.

La velocidad de fase de las ondas Rayleigh  $c_R(f)$  depende de los la estructura del terreno, siendo sus parámetros:

- a) Velocidad de ondas de cizalla (parámetro dominante del modo fundamental de los datos de dispersión de las ondas Rayleigh).
- b) Velocidad de ondas P.
- c) Densidad.
- d) Espesor de las capas.

Xia et al. (2002) destaca en sus investigaciones en el método MASW que la principal ventaja que presenta este método es la capacidad de analizar los modos fundamentales y superiores simultáneamente, proporcionando velocidades de ondas de cizalla ( $V_s$ ) más exactas.

Para aplicar el método MASW en forma activa se necesita una fuente de energía (generalmente golpeo) para producir las ondas superficiales que serán capturadas por un sismógrafo a través de los geófonos. La profundidad que alcanza no solo dependerá de la fuente sísmica utilizada, sino que cambia ligeramente con el tipo de material, alcanzándose, por lo general, una profundidad de investigación del terreno de unas pocas decenas de metros (Park et al., 2003).

En algunas ocasiones, no es suficiente la profundidad de estudio obtenida, por lo que se usan fuentes sísmicas disponibles, de tal forma que la detección del ruido ambiental (tráfico, paso de un tren, paso de peatones, etc.), representa una alternativa eficaz y económica para aumentar dicha profundidad de estudio.

Park et al. (2000), describe el método MASW como; una mejora de algunas pocas pero significativas deficiencias del método SASW (Spectral Analysis of Surface Wave), el cual es un buen método ya que no es destructivo pero con el inconveniente de que solo permite la incorporación de dos geófonos, obligando a que se registren golpes repetidamente en múltiples zonas de campo para alcanzar la profundidad requerida.

La distancia entre el punto de impacto y el primer geófono fue de 4 metros y la separación entre los geófonos de 2 metros, cumpliendo así con las especificaciones técnicas requeridas por Park (1995), donde se recomienda que el espaciado entre los geófonos sea menor que la décima parte de la profundidad de investigación máxima.

Se utilizó, como equipo de medición sísmica, un sismógrafo “DMT Seismic Compact” (Alemania), estando éste conectado a un ordenador portátil, lo que permite el registro y la visualización de los sismogramas obtenidos en tiempo real. El análisis de los sismogramas se llevó a cabo con el programa “SurfSeis 3”, desarrollado por el Kansas Geological Survey (KGS) EE.UU.

Los estudios de onda P y ondas S deben realizarse por separado para obtener  $V_p$  y  $V_s$ . La ejecución de ambos estudios resultara costosa en términos de equipo, procesamiento de datos y tiempo de ejecución. Hay que destacar que en el estudio de las ondas S es generalmente más difícil de adquirir datos de buena calidad que el estudio de las ondas P.

A continuación se presentan los módulos y constantes del terreno que podrían determinarse a partir del conocimiento de  $V_p$  y  $V_s$ :

$$\nu = \frac{\frac{(V_p)^2}{(V_s)^2} - 2}{\frac{2(V_p)^2}{(V_s)^2} - 2} \quad \text{Coeficiente de Poisson}$$

$$G = \rho V_s^2 \quad \text{Módulo cortante o de cizalla}$$

$$E = \frac{[3V_p^2 - 4V_s^2]}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad \text{Módulo de Young}$$

$$K = \rho \left[ V_p^2 - \left(\frac{4}{3}\right) V_s^2 \right] \quad \text{Módulo de compresibilidad}$$



#### 4.2.1 Ondas Rayleigh

Conocidas como “*ground roll*”, las ondas Rayleigh son un tipo de ondas sísmicas superficiales. Éstas están asociadas a terremotos y al movimiento subterráneo del magma, así como a múltiples fuentes de energía sísmica, como explosiones, impactos de martillos en el suelo, movimiento de vehículos, respuesta de la vegetación y estructuras civiles al viento, mareas, etc., todas ellas representativas de las vibraciones naturales que constantemente se propagan por el subsuelo de nuestro planeta. Estas ondas producen un movimiento elíptico y retrógrado en el plano vertical del medio por el que se propagan. (Figura 17).

La amplitud de dicho movimiento va disminuyendo progresivamente, a medida que aumenta la profundidad en el medio, de esta manera, el sentido de rotación de las partículas se invierte con la profundidad, hasta alcanzar nodos donde no se presenta movimiento, seguidos de oscilaciones que corresponden a modos superiores de las ondas Rayleigh (Lay y Wallace, 1995). La propagación de dichas ondas, al ser en superficie, se producen sobre un área bidimensional cilíndrica, con una amplitud que disminuye proporcionalmente a  $1/\sqrt{r}$ , donde  $r$  es el radio desde la fuente.

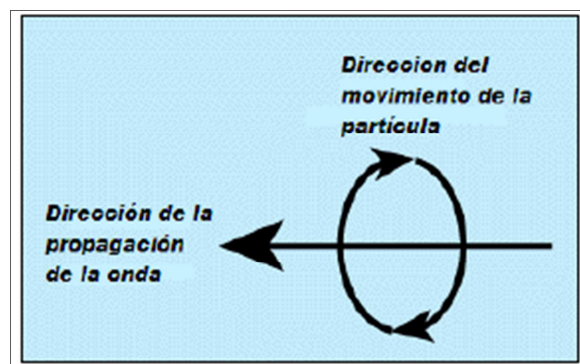


Figura 17. Movimiento de las partículas y relación con la dirección de propagación en las ondas Rayleigh. Tomado de [www.ua.es](http://www.ua.es).

Las ondas Rayleigh presentan un comportamiento dispersivo en su propagación, es decir, se tienen diferentes velocidades dentro de un mismo tren de



ondas, a diferentes frecuencias (o longitudes de onda). De forma que tal comportamiento puede ser cuantificado en forma de una curva de dispersión, que presenta la velocidad de propagación en función de la frecuencia de la onda. Dichas curvas para un sitio en particular contienen información acerca de la distribución de velocidades del subsuelo en función de su profundidad, siendo esta heterogeneidad de velocidades la que permite la existencia del comportamiento dispersivo (Lay y Wallace, 1995).

#### **4.2.2. Adquisición de los datos**

Lo primero es aprovechar todas las fuentes de información para conocer toda la geología del lugar.

No es aconsejable la realización de los perfiles sísmicos para posteriormente obtener la información geológica posterior a los datos geofísicos. Posteriormente se manejará cualquiera de los programas de ordenador existentes para obtener la respuesta sísmica con dichos modelos geofísicos, permitiendo definir la separación más adecuada de los geófonos y los frentes de disparo para alcanzar los objetivos exigidos de la profundidad de investigación y resolución vertical.

Empíricamente se tiene que es aconsejable desplegar perfiles cuya longitud total sea como mínimo tres veces superior a la profundidad de investigación deseada (de P. Martínez Pagán. Prospección Geofísica - 2. Universidad Politécnica de Cartagena 2008).

Lo siguiente a tener en cuenta es la instalación de los geófonos, teniéndose que instalar perfectamente acoplados al terreno (sin posibilidad de holguras o movimientos libres en los geófonos). (P. Martínez Pagán . Prospección Geofísica - 2. Universidad Politécnica de Cartagena 2008), recomienda realizar pequeños barrenos de un metro de profundidad, rellenar con agua para saturar con sedimentos y colocar dentro de ellos a los geófonos. Si es posible, los geófonos se colocarán en línea con igual elevación, por lo que si existieran diferencias de cota entre ellos y las fuentes de disparo, se deberá de realizar correcciones estáticas.

En nuestro caso, para poder grabar la dispersión de las ondas superficiales se usan un solo geófono por canal, colocados correlativamente de forma lineal hasta un total de 24 canales. Las frecuencias de los geófonos normalmente van de 4,5-28 Hz, pudiéndose utilizar geófonos de frecuencias menores para mayores profundidades de estudio, en nuestro caso de estudio se emplearon geófonos de 4,5 Hz. Los espaciamentos y longitudes de tendidos dependerán de la profundidad de investigación y nivel de resolución deseados, encontrándose desde 1 m (estudios de alta resolución) hasta 10 m o más para estudios profundos.

Todo lo anterior, desde el punto de vista de la adquisición en campo, representa la ventaja más importante del método, ya que los registros se adquieren de forma rápida y económica. Es necesario la activación de una fuente de energía sísmica, la cual será activada por el usuario, funcionando de tal manera mejor en ambientes urbanos sísmicamente muy ruidosos. Como ya se dijo, el tráfico, la respuesta al viento de los árboles y de los edificios, y cualquier otra perturbación urbana contienen tales ondas superficiales que este método analiza (Louie, 2001).

Este método tiene que apoyarse del sistema de adquisición del tipo “*Landstreamer*”, mediante una disposición de geófonos, colocados de forma tal que se acoplan al suelo o pavimento de estudio para detectar las ondas superficiales. Estas ondas describen la variación de la velocidad de cizalla con respecto a la profundidad, obteniendo el perfil Vs. El sistema LandStreamer nos da un alto rendimiento, puesto que los estudios sísmicos requieren de un tiempo en el desplazamiento de equipos, además coloca los geófonos con relativa facilidad en el lugar de trabajo cada vez que se realiza un perfil, proporcionando buena protección para los cables sísmicos y el sistema en general. En este sentido, se ha empleado un sistema “*Landstreamer*” desarrollado en la Universidad Politécnica de Cartagena, apropiado a las necesidades del estudio, que posibilita cubrir o estudiar zonas amplias con menores inversiones de tiempo que otros dispositivos más convencionales.

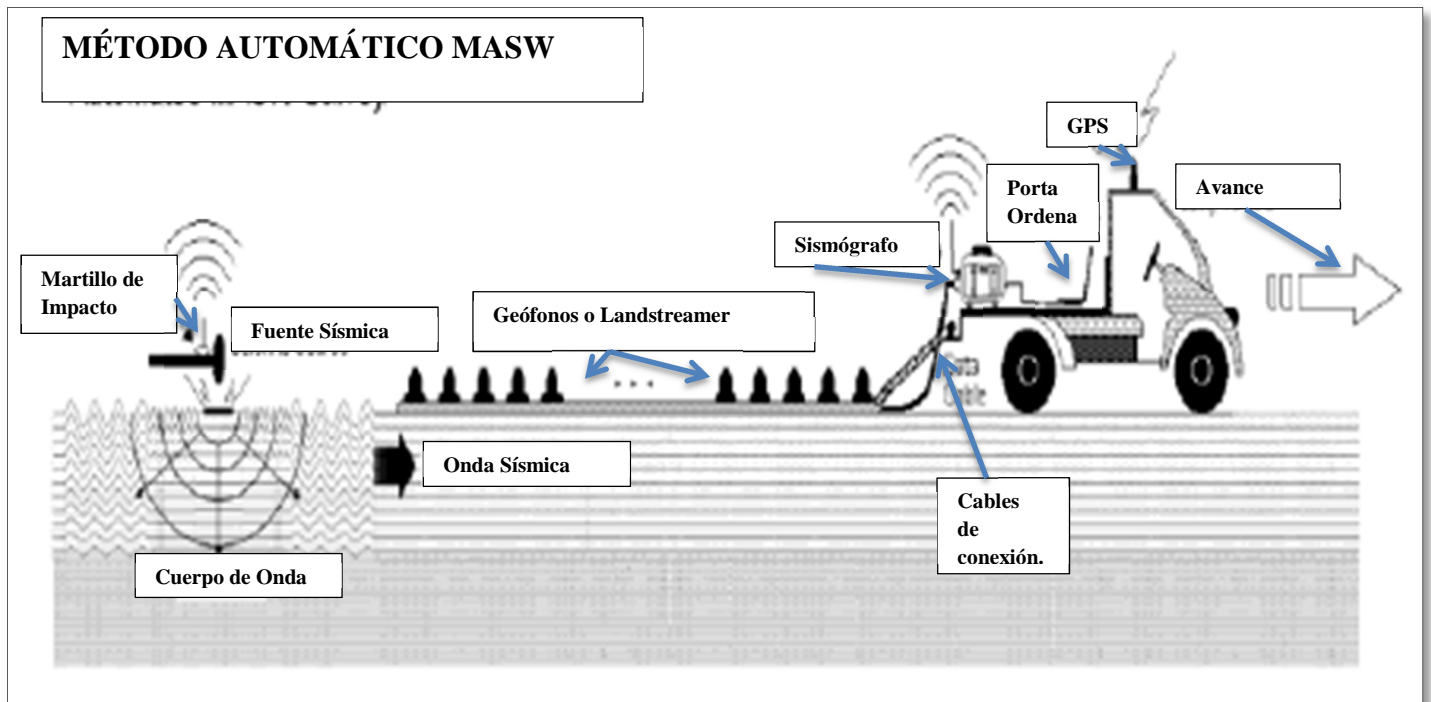


Figura 18. Landstreamer desarrollado por el Servicio Geológico Kansas. USA. (Park et al., 1999).

Aplicación de técnicas sísmicas como herramienta para la obtención de parámetros geomecánicos del terreno en la urbanización Camposol, (Mazarrón)



**A**



**B**



**C**



**D**

*Figura 19. Equipo Landstreamer utilizado por la Universidad Politécnica de Cartagena.*

*A. Línea de geófonos con vehículo de transporte.*

*B. Conexionado de equipo sísmico sobre carro móvil (batería y equipo informático), con línea de geófonos.*

*C y D. Generación de onda sísmica para el equipo Landstreamer por golpeo en placa de acero.*

La  $V_{s30}$  es un parámetro fundamental en la zonificación sísmica, ya que permite categorizar los suelos según Eurocódigo (EC8).

Tabla 1. Tipos de suelo según el Eurocódigo (EC8). (Soils type according to EC8.)

Tipo de suelo (EC8)	Descripción	$V_s^{30}$ (m/s)
A	Roca dura	>800
B	Suelo muy denso o roca blanda	360-800*
C	Suelos rígidos	180-360
D	Suelos medios a blandos	<180

\* Con el objetivo de una mejor clasificación se ha optado por dividir en dos partes el suelo tipo B en suelos tipo B1 (500-800 m/s) y B2 (360-500 m/s) (Navarro et al., 2013)

#### 4.2.3 Procesado de datos

##### 4.2.3.1 Análisis espectral (p-f) de velocidades

El método MASW, realiza un procesado de datos, mediante una transformada bidimensional lentitud-frecuencia ( $p$ - $f$ ) de los registros de campo, pudiéndose realizar una separación, identificación y selección de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh (con velocidades de fase verdaderas), de entre todos los registros. Esta es la segunda idea fundamental del método (Louie, 2001).

La base de este análisis espectral es la transformada  $p$ - $\tau$ . Esta transformada toma un registro de campo, con las amplitudes relativas a la distancia y al tiempo ( $x$ - $t$ ), y las transforma en amplitudes relativas al parámetro de rayo  $p$  (el inverso de la velocidad aparente, también conocido como lentitud) y un tiempo intercepto  $\tau$  (Louie, 2001).

La transformada  $p$ - $T$  es una integral de línea sobre una traza sísmica  $A(x, t)$  en distancia  $x$  y tiempo  $t$ :

$$A(p, T) = \int_x^\infty A(x, t = T + px) dx \quad (2)$$

donde  $T$  es tau y la pendiente de la línea  $p = dt/dx$  es el inverso de la velocidad aparente  $V_a$  en la dirección  $x$ .

En la práctica,  $x$  es discretizada en  $nx$  intervalos a espaciamiento finito  $dx$  (separación entre receptores) así que  $x = j dx$ , con  $j$  entero. De forma similar, el tiempo es discretizado con  $t = i dt$  (donde  $dt$  es el intervalo de muestreo), lo cual permite obtener una forma discreta de la transformada  $p$ - $T$ , para  $p = p0 + l dp$  positivas y negativas y  $T = k dt$ :

$$A(p = p0 + l dp, T = k dt) = \sum_{j=0}^{nx-1} A(x = j dx, t = i dt = T + px) \quad (3)$$

comenzando con  $p0 = -pmax$ .

El valor  $pmax$  define el inverso de la velocidad mínima que se encontrará, que usualmente se coloca en 100 m/s para sedimentos sueltos. El parámetro  $np$  se supone generalmente como dos veces  $nx$ . Aquí  $dp$  puede abarcar un rango entre 0.0001-0.0005 s/m, y se establece que recorra el intervalo entre  $-pmax$  y  $pmax$  a  $2np$  pasos. Esta transformada analizará la energía propagándose en ambas direcciones a largo del tendido. Los tiempos de intercepto después de aplicar la transformada son simplemente tiempo de llegada a uno de los extremos del tendido.

El paso siguiente es aplicar una transformada de Fourier discreta unidimensional en el eje del tiempo de intercepto  $tau$ . De esta forma se pasa del espacio  $p$ - $T$  al espacio  $p$ - $f$ . Si queremos tener una buena resolución de frecuencia se deben de tener tiempos de grabación superiores a los normalmente usados en la sísmica de refracción. Por esta razón, se emplean normalmente registros de 20-30 s.



El espectro de potencias  $SA(p, f)$  es la magnitud al cuadrado de la transformada compleja de Fourier (Louie, 2001):

$$(p, f) = FA(p, f) \cdot FA(p, f) \quad (4)$$

Este método suma dos transformadas  $p$ - $f$  de un registro, en ambas direcciones en toda la longitud del tendido de receptores. Para sumar la energía de las ondas en ambas direcciones a un único eje de lentitud que represente el valor absoluto de  $p$ , el eje de lentitud es simétricamente rotado en  $p=0$  con:

$$SA = (|P|) = [SA(p, f)]_{p \geq 0} + [SA(-p, f)]_{p < 0} \quad (5)$$

De este modo se completa la transformada de un registro de distancia-tiempo ( $x$ - $t$ ) en lentitud-frecuencia ( $p$ - $f$ ).

El análisis lentitud-frecuencia ha producido un registro de la energía espectral total en todos los registros de un sitio, el cual es representado mediante gráficas en ejes de lentitud-frecuencia ( $p$ - $f$ ). Se puede seleccionar, una curva de dispersión que se podrá analizar posteriormente, si se observa en el interior de los ejes una energía significativa de las ondas Rayleigh (Louie, 2001).

En la imagen siguiente, se muestran los modos en las fases dispersivas, normales en capas superficiales de baja velocidad: bajando desde altas velocidades de fase (baja lentitud) a frecuencias bajas, hasta velocidades de fase menores (alta lentitud) a frecuencias más altas (Figura 20). Esta pendiente diferenciada representa la ventaja real del análisis  $p$ - $f$ . Otros eventos que son grabados en los registros de microtemores, como ondas de cuerpo o de aire, no pueden tener dicha pendiente. Aun siendo la energía en un registro sísmico es otra fase diferente a las ondas Rayleigh, el análisis  $p$ - $f$  mostrará dicha energía (en la imagen lentitud-frecuencia) lejos de las curvas de dispersión que con esta técnica se interpretan (Louie, 2001). Al grabar con muchos canales, con sismogramas verticales completos, y empleando la transformada  $p$ - $f$ , este método (como el MASW, Multi-channel Analysis of Surface Waves, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) analiza correctamente la dispersión de las ondas Rayleigh en situaciones donde otros métodos de análisis de ondas superficiales no pueden.

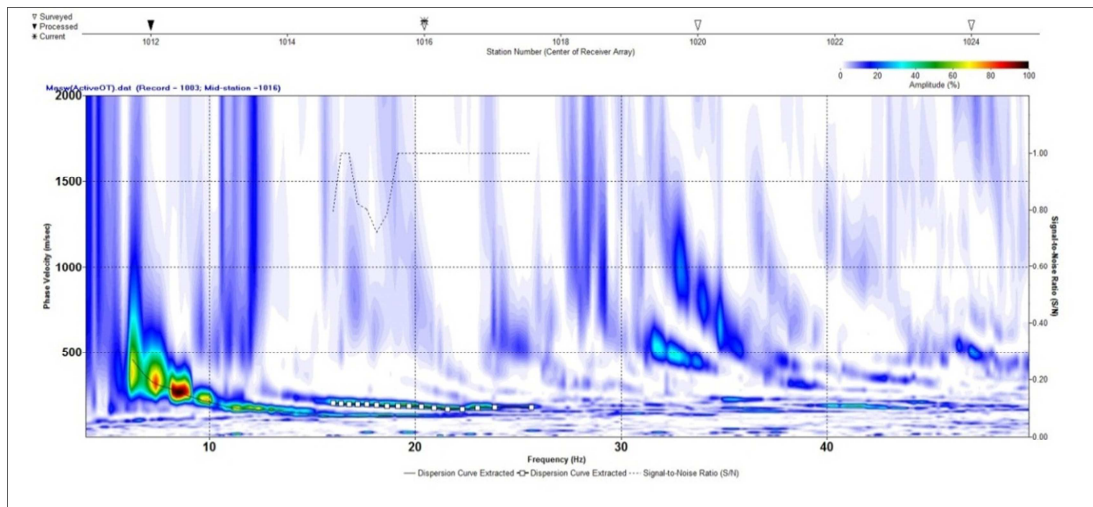


Figura 20. Imagen espectral resultante al aplicar la transformada  $p$ - $f$ . Se observa la tendencia típica de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh (puntos seleccionados).

#### 4.2.3.2 Selección de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh

Se obtiene una normalización de las imágenes  $p$ - $f$ , mediante el cálculo de un cociente espectral de energía. Calculado en cada combinación de lentitud – frecuencia tomando el valor de la energía en ese punto y dividiéndolo entre la suma de la energía para todos los valores de lentitud en esa frecuencia. De tal forma que la selección de velocidades de fase en las frecuencias donde se observará claramente una pendiente pronunciada (cambio de color rojo-verde a color azul en la figura 20) permitiendo identificar la curva de dispersión deseada (Louie, 2001). Esta forma de seleccionar las velocidades de fase más bajas (en las pendientes inferiores y no en los picos de los cocientes espectrales) cuenta con la ventaja de que evita que se escojan velocidades de fase aparentes elevadas, causadas por ondas que llegan oblicuamente al tendido lineal (figura 20).

Además, la selección de las velocidades de fase más bajas para la curva de dispersión tiene otro efecto deseable: debido al hecho de que los modos superiores de las ondas Rayleigh tienen velocidades de fase superiores a las del modo

fundamental, la técnica MASW proporciona preferencialmente las velocidades de dicho modo (Louie,2001). Los modos superiores aparecerán como tendencias de dispersión separadas en las imágenes  $p$ - $f$ , si es que son tan energéticos como el modo fundamental.

#### 4.2.3.3 Modelado de las ondas S

El método MASW proporciona un modelado interactivo hacia delante de la curva de dispersión (en modo fundamental), seleccionada a partir de las imágenes  $p$ - $f$ , haciendo uso de un código adaptado de Saito (1979, 1988) por Yuehua Zeng (1992) en Louie (2001). El modelado itera en la velocidad de fase a cada periodo (o frecuencia), reporta cuándo no se ha encontrado una solución con los parámetros de iteración y puede modelar inversiones de velocidad (Louie, 2001).

Mediante el programa informático correspondiente se ha dotado de la capacidad de realizar el modelado a través de un modelo gráfico por capas ajustable por el usuario. Dicha parte del procesamiento es la más dependiente de la experiencia y habilidades del intérprete de la curva de dispersión para calcular la estructura de velocidades.

Si se cuenta con el intérprete adecuado y con la suficiente experiencia, se tiene una ventaja añadida, ya que se pueden obtener resultados más realistas que con un método de inversión automatizado.

Los problemas con las inversiones automatizadas (que tienden a exagerar anomalías) en otras áreas de la prospección geofísica, como la gravimetría, magnetometría y métodos eléctricos, han llevado a la popularización de los modelados interactivos en esos campos (Louie ,2001).

#### 4.3 PARÁMETROS GEOMECAÑICOS DEL SUBSUELO (CONSTANTES ELÁSTICAS)

Las constantes elásticas, conocidas como módulos elásticos, son un conjunto de parámetros que definen las propiedades y comportamiento de un material que se somete a esfuerzos, sufre deformaciones, y luego recupera su forma original después de que los esfuerzos cesan (*i.e.* material elástico). Dichas constantes representan una gran importancia en la sismología ya que la velocidad de las ondas sísmicas depende de las mismas y de la densidad de las rocas. Siendo empleadas para la caracterización de zonas en la geotecnia aplicada a ingeniería civil, por lo que su investigación y cuantificación mediante métodos geofísicos es un área de aplicación interesante y permite ampliar los alcances de la geofísica de ambientes urbanos (Cetraro, 2007).

Las constantes elásticas tienen gran importancia en la teoría de la elasticidad, específicamente en la teoría de la elasticidad lineal. Esta última data a los materiales sólidos elásticos lineales sometidos a pequeñas deformaciones, de tal manera que los esfuerzos y deformaciones se relacionen linealmente entre sí. Por lo general un sólido elástico lineal sometido a grandes esfuerzos no cumplirá con esta condición. Con lo que, la teoría de la elasticidad lineal sólo es aplicada a sólidos elásticos lineales sometidos a deformaciones pequeñas.

Un material elástico lineal está constitutivamente descrito por la Ley de Hooke, la cual, en el caso de un sólido elástico, homogéneo e isótropo, tiene la siguiente forma

(Mendoza, 1998):

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (6)$$

Cuando el material cumple dichas condiciones (es linealmente elástico, homogéneo e isótropo) su comportamiento y propiedades elásticas quedarán totalmente determinadas por sólo dos constantes elásticas y, con tan solo dos de ellas, todas las otras pueden ser calculadas de acuerdo a varias fórmulas existentes.

Las constantes elásticas más comunes son las siguientes:

- Módulo de volumen (incompresibilidad volumétrica) (K)
- Módulo de Young (E)
- Módulo de cizalla (rigidez) (G)
- Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )

#### **4.3.1 Módulo de volumen (de incompresibilidad, K).**

Este módulo de material o sustancia mide la resistencia a ser comprimido uniformemente. Dicho de otra forma, es el incremento de presión necesario para causar una cierta disminución relativa de volumen. El inverso del módulo de volumen indica la compresibilidad del material. El módulo de volumen puede definirse formalmente como (Mendoza, 1998):

$$K = -V \partial_p / \partial_v \quad (7)$$

En función de las velocidades de las ondas sísmicas, el módulo de volumen se puede expresar como:

$$K = E/3(1-2\nu) \quad (8)$$

#### **4.3.2 Módulo de Young (E)**

Nos data de la rigidez de un material elástico isótropo. Definido como el cociente entre el esfuerzo uniaxial sobre la deformación uniaxial (en un mismo eje) sufrida por el material, en el rango de esfuerzos en los que la Ley de Hooke es válida (Mendoza, 1998). Obteniéndose experimentalmente mediante la pendiente de una curva esfuerzo-deformación obtenida a partir pruebas tensionales llevadas a cabo en una muestra del material.

Como ejemplo se puede citar que nos cuantifica la deformación de una barra realizada de un material elástico isótropo sometida a regímenes compresionales o extensionales.

El módulo de Young puede ser expresado como:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (9)$$

G: Corresponde al módulo de cizalla.

$\nu$ : Corresponde al coeficiente de Poisson.

#### 4.3.3 Módulo de cizalla (rigidez) (G)

Definida como la tasa de esfuerzo cortante (de cizalla) por deformación a cortante para un material dado, es decir, describe el comportamiento del mismo ante un esfuerzo de cizalla. En sólidos homogéneos e isótropos, la velocidad de las ondas de corte (S) está controlada por el módulo de cizalla (Mendoza, 1998):

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad (10)$$

En forma equivalente:

$$G = \rho V_s^2 \quad (11)$$

#### 4.3.4 Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )

Es la tasa de deformación compresiva o transversal (normal a la carga aplicada) a la deformación extensiva o axial (paralela a la carga aplicada) para un material en particular. Cuando un material es estirado en una dirección, el mismo tiende a expandirse (o, en casos raros, a contraerse) en las otras dos direcciones, y viceversa (efecto de Poisson). El coeficiente de Poisson es una medida de esta tendencia (Mendoza, 1998).

Suponiendo que el material es comprimido a lo largo de la dirección axial:

$$\nu = -\epsilon_{\text{trans}} / \epsilon_{\text{axial}} = -\epsilon_x / \epsilon_y \quad (12)$$



En función de las velocidades sísmicas:

$$V = (V_p)^2 - 2(V_s)^2 / 2(V_p)^2 - (V_s)^2 \quad (13)$$

Este coeficiente, si pertenece a un material estable no puede ser de menos de 0 mayor de 0.5 ya que los módulos de cizalla y volumen tienen que presentar valores positivos. Un material perfectamente incompresible deformado elásticamente a deformaciones pequeñas tendrá un coeficiente de Poisson de 0.5.

#### 4.3.5 Capacidad de carga (*Bearing capacity*)

Es la capacidad que el terreno tiene para soportar los esfuerzos (cargas) aplicadas al mismo. Definida forma más técnica, es la presión de contacto promedio máxima entre el cimiento y el suelo que no debe producir fallas de corte en este último. Este parámetro es normalmente utilizado en la ingeniería civil para la caracterización geotécnica del lugar, previa a la construcción de una estructura o cualquier otra causa que implique el sometimiento de carga al terreno.

Dicha capacidad de carga puede ser descrita en función de la velocidad de las ondas de corte medidas en sitio mediante métodos geofísicos, mediante una expresión empírica propuesta por Tezcan *et al.* (2006), basada en una variedad de casos de estudio, que incluyen datos de pozo, pruebas de laboratorio y prospección geofísica. Dicha expresión es coincidente con los resultados teóricos empleados en la investigación de dicho parámetro (capacidad de carga), y resulta probado en su seguridad como método (Tezcan *et al.*, 2006).

Dicha expresión tiene la forma siguiente:

$$q_a = 2,4(10^{-4}) \rho V_s \quad (14)$$

Por recomendación de Tezcan *et al.* (2006), esta expresión debe usarse con precaución. En el caso de edificios relativamente importantes, este parámetro tiene que ser calculado por los métodos clásicos, con pruebas adicionales a las que ya se han realizado, ya que no ha sido ampliamente calibrado y probada.

## 5.- INSTRUMENTACIÓN.

---

Se llevaron a cabo en cada una de las zonas las siguientes fases:

1. Toma de datos mediante tomografía sísmica
2. Toma de datos con el método sísmico MASW.
3. Procesado de los datos de tomografía sísmica y método MASW.
4. Cálculo de los perfiles de velocidades de ondas S y P
5. Cálculo de los parámetros geomecánicos del terreno (constantes elásticas).



A



B

*Figura 21. A: Colocación totalmente recta de la línea en serie de geófonos, así como marcado en terreno para el posterior golpeo con placa de acero y maza de 8 Kg.*

*B: Geófono con rosca y conexiones rápidas para colocar en línea.*

## 5.1 TOMOGRAFIA SÍSMICA

### 5.1.1 Adquisición de los datos

En todas las áreas estudiadas se emplearon tendidos de 24 geófonos de 4,5 Hz, así como un geófono de activación de 24 Hz, colocado a unos centímetros de cada golpeo. La separación entre los geófonos fue de 2 metros, se realizaron disparos mediante maza de 8 kg en la parte central entre dos geófonos (aproximadamente a 1 m de cada uno de ellos), de esta manera se procesaron hasta 12 disparos por cada uno de los tres perfiles que se llevaron a cabo. Se le adaptó una placa especial de acero para que el golpeo puntual se disipe en la placa y se transmita al terreno sin producir daño alguno al pavimento

Se utilizó como equipo de medición sísmica un sismógrafo “DMT Seismic Compact” (Alemania) figura 22. El análisis de los datos se llevó a cabo con el programa “SurfSeis 3”, desarrollado por el Kansas Geological Survey (KGS) EE.UU.

Los registros fueron grabados con tasas de muestreo de 1/4 ms y longitudes de registro de 256 ms.



*Figura 22. Sismógrafo (DMT) adquirido por UPCT, (sin conexionado).*

El principal objetivo del estudio fue enfocado a las profundidades de interés para las aplicaciones de ingeniería (i.e. los primeros 10 -15 m), así como la obtención de hasta los 30 m para la Vs30, razón por la que se optó por una separación corta de 2 m entre receptores. Dicha separación fue suficiente para lograr la profundidad deseada. De igual manera, se ha observado la limitación que el ambiente urbano o núcleo poblacional impone al método de tomografía sísmica en cuanto a la selección de las primeras llegadas de las ondas compresionales, puesto que se tiene que prever que en el momento de disparo, no tiene que haber ninguna otra fuente que pueda producir ruidos o vibraciones, ya que de lo contrario se producen errores en las llegadas.



*Figura 23. Geófonos y segmento del tendido de adquisición empleados en (Áreas G1, G2, G3), conectados entre ellos en serie.*

### 5.1.2 Procesado de datos

Los datos obtenidos fueron procesados utilizando software *Rayfract*. Éste presenta menores limitaciones para trabajar con tendidos más pequeños, con un alto nivel de ruido, manteniendo un menor error de programación y un procesamiento sencillo por la gran cantidad de herramientas del que dispone.

Con la profundidad, a medida que se aumenta, se aprecia en el gradiente de velocidades, variaciones de dicha velocidad. Los perfiles de capas discretas nos dan una información más precisa de las interfaces entre capas; sin embargo, para suelos granulares sueltos, puede no tener la misma exactitud, ya que hay una tendencia de aumento gradual de velocidad en función a la profundidad, motivada por el aumento de la presión de soterramiento. Siendo la interpretación mediante un gradiente de velocidades más realista (Rucker, 2002). También, este método nos permite el cálculo de los parámetros geomecánicos superficiales del subsuelo con una gran resolución, puesto que se tienen valores de velocidades a intervalos de profundidad menores.

Este método nos aporta un valor añadido, que es el grado de detalle de los modelos y que la presencia de capas de baja velocidad, con fuertes gradientes laterales y elevados buzamientos no nos limitan el proceso de este método.

La tomografía sísmica está basada en la inversión de residuos (diferencia entre tiempos de recorrido de ondas P observadas y teóricas). El proceso de inversión es un proceso iterativo, en el que un modelo inicial se actualiza hasta dar lugar al modelo final. Otra ventaja de este método sísmico es la determinación cuantitativa (valor del mínimo de residuos) y cualitativa (a través de la distribución espacial de rayos dentro del modelo), el grado de certeza de las soluciones obtenidas, siendo muy útil a la hora de realizar la interpretación del modelo.

## **5.2 MÉTODO SÍSMICO MASW.**

### **5.2.1 Adquisición de los datos**

Como en el caso de la tomografía sísmica, se utilizaron tendidos de 2 m de separación y 24 geófonos para las tres áreas de estudio. Siendo la distancia entre el punto de impacto y el primer geófono (offset) de 4 metros. Con este método no fue necesario realizar más disparos por cada perfil, siendo en total 3 disparos y siempre manteniendo los 4 m de separación (offset) del primer geófono a la hora de adelantar las líneas de geófonos. En cada zona se llevaron a cabo tres perfiles consecutivos y en serie, separados 8m hacia adelante en cada perfil, para obtener una mayor longitud de dicho perfil en la zona correspondiente, así como un mejor solapamiento entre tomografía y éste método.

Los geófonos utilizados fueron de 4,5 Hz y los registros fueron grabados utilizando tanto ruido ambiental únicamente (fuente pasiva) como golpes de martillo de 8 kg sobre placa de acero (fuente activa) adicionales al ruido ambiental. Esto último se hizo con el objetivo de aumentar el contenido de altas frecuencias de la señal grabada y así mejorar la señal en esa banda.

Esta toma de datos se realizó al igual que con el método anterior, con el mismo sismógrafo (ventaja importante al no ser necesario equipos más sofisticados y costosos). Se realizaron tasas de muestreo de 1/4 ms, longitudes de registro de 2944 ms. La adquisición de datos, como ya se ha mencionado, son registros de campo con trazas sísmicas (de ruido ambiental) grabadas en cada uno de los canales.

### **5.2.2 Procesado de datos**

Los datos fueron procesados mediante el programa “SurfSeis 3”, desarrollado por el Kansas Geological Survey (KGS) EE.UU.

Dicho programa contiene de varios módulos que hace que podamos seleccionar la curva de dispersión de las ondas Rayleigh (ondas superficiales), por medio de la transformada p-f de los registros obtenidos. Se ha realizado un



modelado hacia delante con esta curva, permitiéndose realizar un modelado final de las velocidades de las ondas de corte. Dichos modelos se pueden generar por aproximación por capas discretas y/o por gradiente de velocidades metro a metro, gracias al espacio aplicado de 2 m entre geófonos que permite una cobertura de alta resolución de aproximadamente los primeros 10-15 m del subsuelo, e incluso hasta los 30m, siendo igual que en el caso de tomografía sísmica.

En el proceso final se obtiene un modelo de velocidades 1D primeramente, de ondas de corte para la zona de calles estudiada. El “SurfSeis 3” cuenta con herramientas para la generación de modelos 2D a partir de modelos 1D obtenidos, utilizando varios tendidos consecutivos, permitiendo una óptima identificación de las variaciones laterales en la distribución de velocidades del subsuelo, así como un aumento de la longitud del perfil.

### **5.3 CÁLCULO DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DEL TERRENO**

Las constantes elásticas del subsuelo fueron calculadas para cada una de las calles, mediante los perfiles de velocidades de ondas compresionales  $V_p$  (obtenidos con el método de tomografía sísmica) y ondas de corte  $V_s$  (obtenidos con el método sísmico MASW). Se emplearon las relaciones que se presentan en el marco metodológico, así como los programas informáticos Rayfract con tomografía sísmica y Surfseis 3.0 para el método Masw, para el cálculo de estos parámetros, según se muestra en los resultados de los cuadros o tablas correspondientes (tabla 2, 3 y 4), así como las gráficas que van de la 40 hasta la 51, ambas inclusive.

## 6.-RESULTADOS Y DISCUSIONES.

---

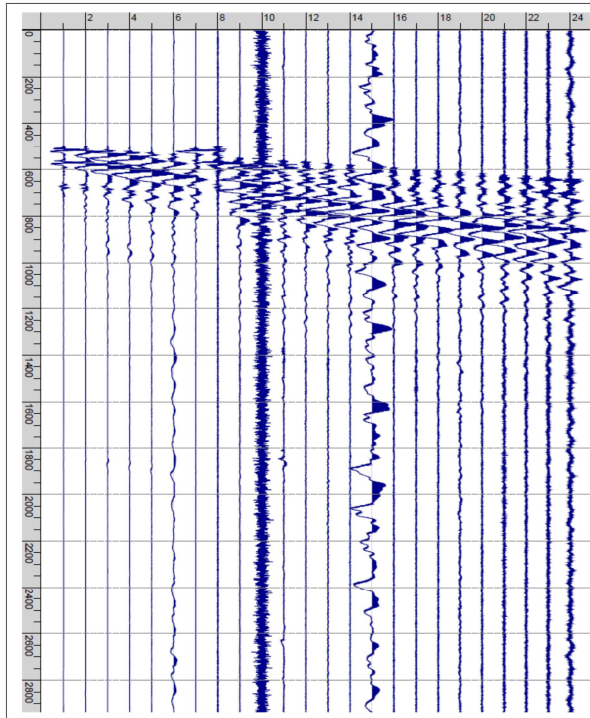
A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las calles estudiadas.

Estos resultados incluyen los registros de tomografía sísmica, las imágenes (transformadas) p-f, los perfiles de velocidades de ondas P y S, así como todos y cada uno de los parámetros geomecánicos calculados para cada una de estas calles mediante los programas informáticos descritos anteriormente.

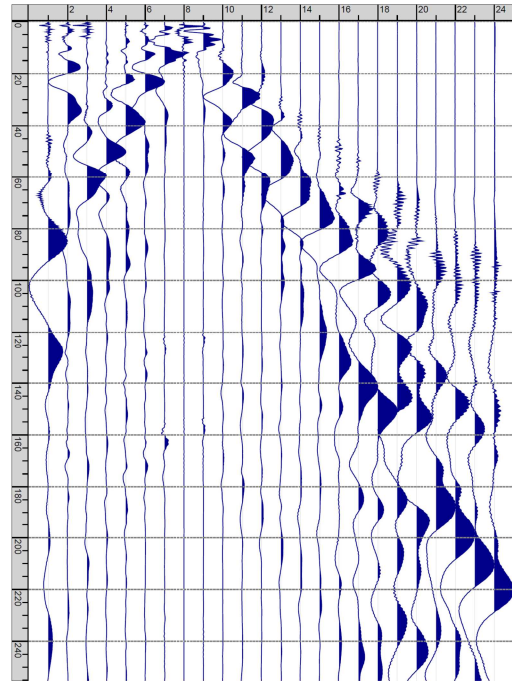
### 6.1 RESULTADOS COMPARATIVOS DE LAS TRES ZONAS

Una representación gráfica de los registros de disparo de sísmica Masw para la obtención de  $V_s$ , así como los registros de disparo de tomografía sísmica ( $V_p$ ), se pueden apreciar en las figuras 24, 25 y 26, correspondientes a las tres calles o zonas estudiadas. En ellas se puede apreciar las ondas generadas tras el golpe, observándose la atenuación de la señal que se genera en los geófonos próximos al golpeo, al igual que las zonas de alto ruido sísmico, (zonas G2 y G3).

Se puede ver la tendencia de aumento a medida que la distancia de la traza con respecto al disparo también aumenta. Así pues se verifica que, el nivel de ruido también debe analizarse (cualitativamente) teniendo en cuenta la separación entre receptores (2 m).



**A**



**B**

*Figura 24. Zona G1, calle Araucarias.*

*A: Registros de disparo. Sísmica Masw para la obtención de la  $V_s$ .*

*B: Sismograma obtenido para registro de disparo, tomografía sísmica  $V_p$ .*

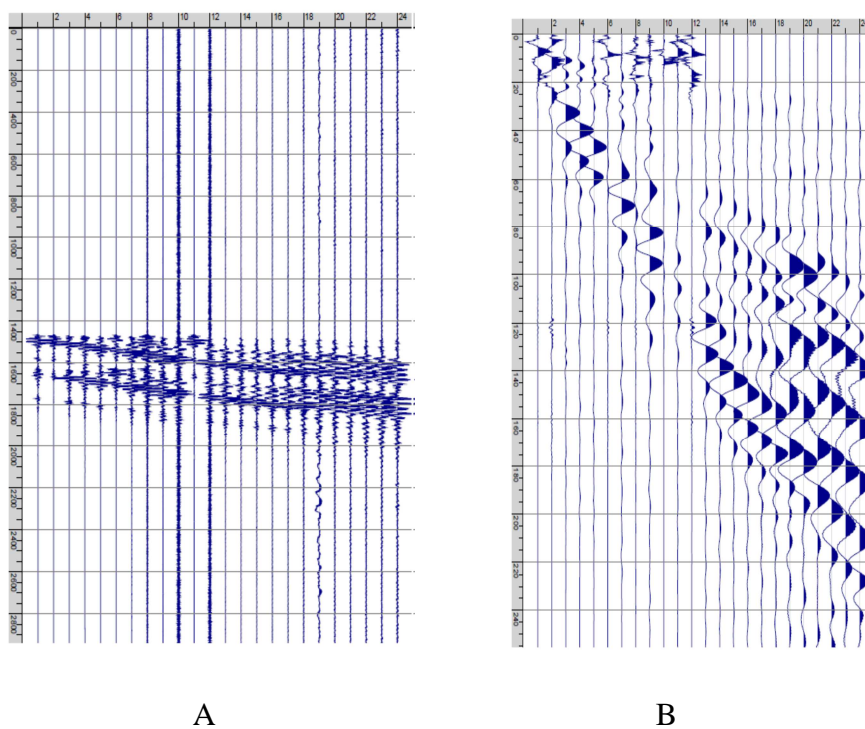


Figura 25. Zona G2, calle Alobe.

A: Registros de disparo. Sísmica Masw para la obtención de la  $V_s$ .

B: Sismograma obtenido para registro de disparo, tomografía sísmica  $V_p$ .

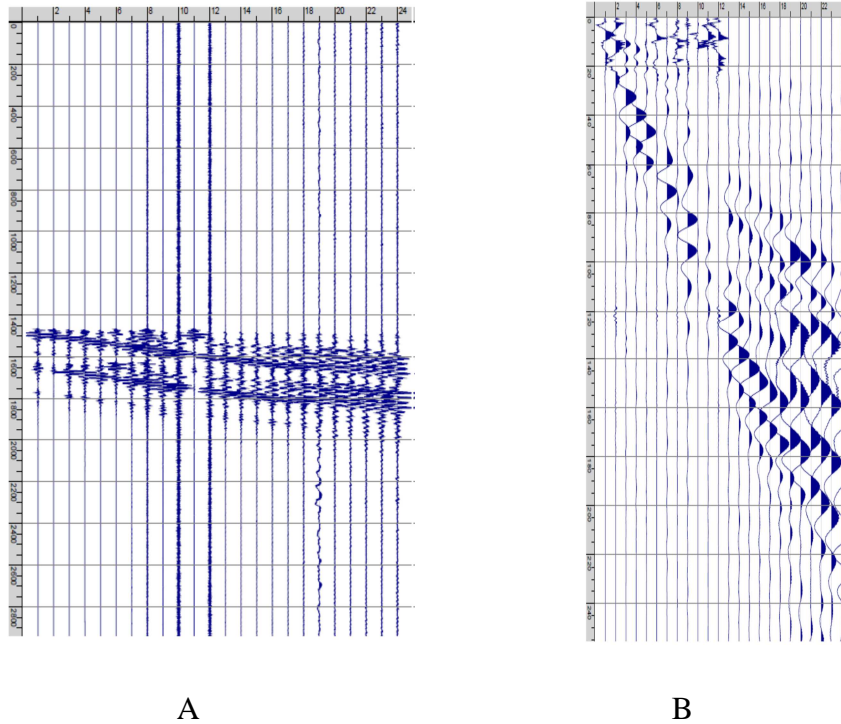


Figura 26. Zona G3, explanada paralela a calle Alobe.

A: Registros de disparo. Sísmica Masw para la obtención de la  $V_s$ .

B: Sismograma obtenido para registro de disparo, Tomografía Sísmica  $V_p$ .

En las figuras 27, 28 y 29 se observa la imagen p-f obtenida mediante el método MASW de las tres zonas.

La transformada p-f (Figura 27, 28 y 29) nos dan una selección de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh, observando un cambio muy marcado en el cociente espectral (ver Marco Teórico), como consecuencia de haber obtenido un buen registro de ruido ambiental en campo.

A diferencia de la zona anterior (G1), las zonas G2 y G3 nos proporcionaron unos resultados del método de tomografía sísmica, afectados por un mayor nivel de ruido sísmico ambiental, causado por la presencia de un elevado volumen de tráfico en la misma vía pública del tendido. En el caso del método MASW dicha limitación se transforma en una ventaja que otorga mayor confiabilidad a sus resultados.

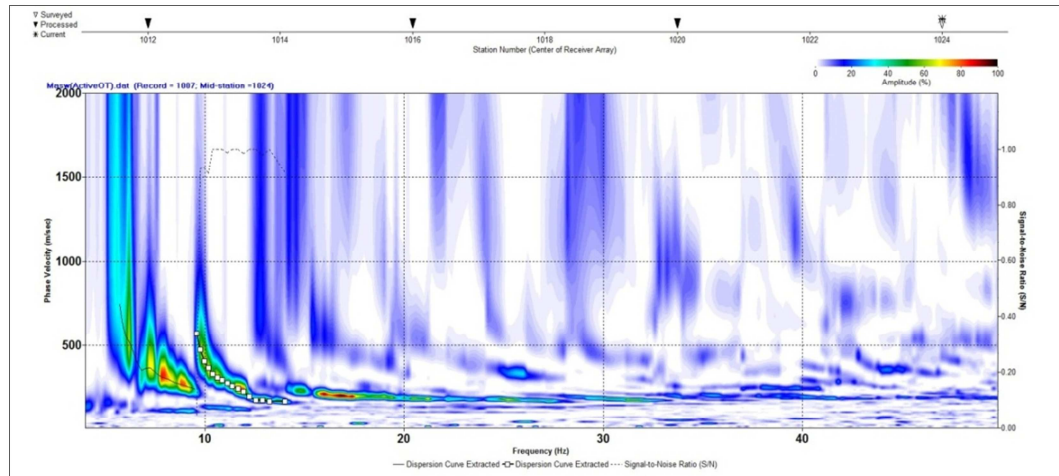


Figura 27. Transformada  $p,f$  y selección de la curva de dispersión.(Zona G1, calle Araucarias).

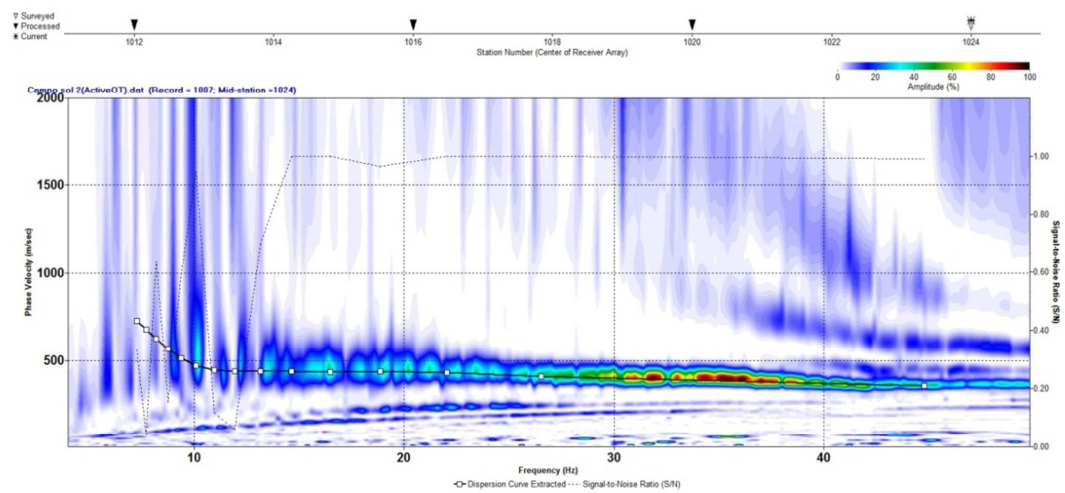


Figura 28. Transformada  $p,f$  y selección de la curva de dispersión.(Zona G2, calle Alobe).



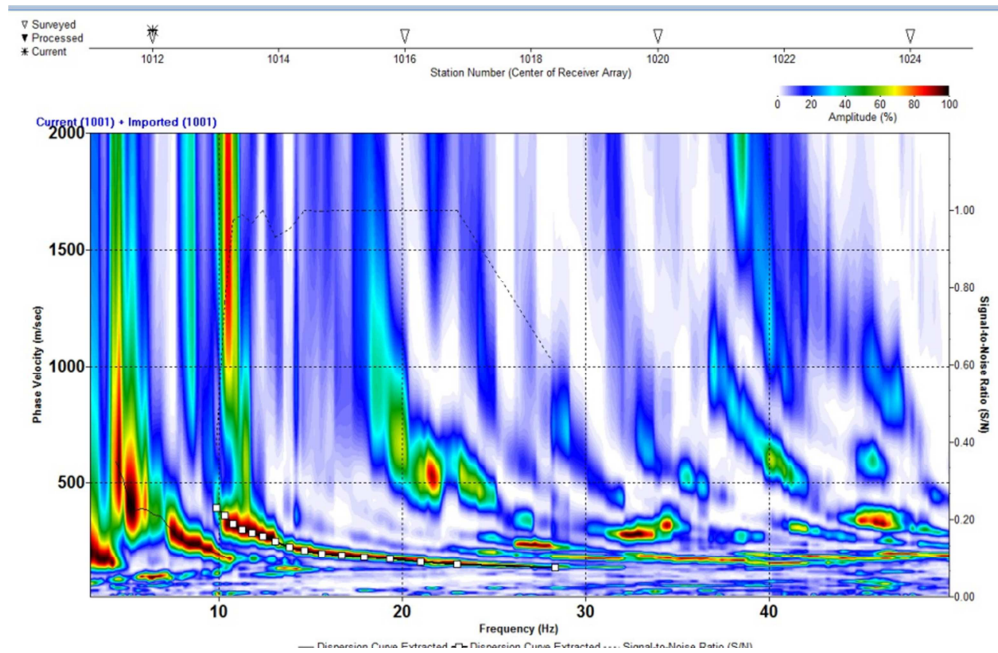


Figura 29. Transformada  $p.f$  y selección de la curva de dispersión. (Zona G3, explanada paralela a calle Alobe).



A continuación se puede apreciar las secciones 2D de velocidades de ondas S según el método Masw para la obtención de ( $V_s$ ), figuras 31, 32 y 33, pudiéndose ver la correlación del aumento de  $V_s$  en función a la profundidad, lo cual probablemente es causado por el aumento gradual en la presión de soterramiento para estos primeros metros de sedimento. Viéndose en la zona G1 (figura 31), que hasta los 5 primeros metros se tiene una  $V_s$  muy baja, por debajo de 180 m/s, correspondiente a suelos muy blandos, lo cual demuestra la correlación existente con el lugar, ya que en el mismo se observan los aportes de relleno sin el correspondiente tratamiento de compactación (Margas sin compactar).



*Figura 30.: Zona G1. Relleno sin compactar.*

En esta misma zona (G1), se observa que a partir de los 5m se tiene una  $V_s$  de 200m/s, correspondiente a un suelo rígido (según Ec8). También se puede observar que a los 30m se tiene una  $V_s$  de aproximadamente 500m/s, correspondiente a suelo muy denso o roca blanda, tipo B1 (según EC8), correlacionado en esta profundidad con el grado de compactación de las Margas existentes en el lugar.

En la zona G2 (figura 32), se ve que hasta los primeros 10 m se tiene un suelo muy denso o roca blanda tipo B2 según el EC8, entre 420 y 480 m/s, (Margas con alta compactación), lo cual demuestra la correlación existente con el lugar, ya que en el mismo se observan la inalterabilidad del lugar, tanto del suelo como de sus edificaciones.

A partir de los 15 m se tiene una disminución de  $V_s$ , aproximadamente de 400m/s, siendo a los 20 m de unos 300 m/s aproximadamente, hasta llegar a los 25 m de profundidad, en el cual ya se experimenta un aumento de  $V_s$  (430 m/s), lo que verifica el cambio de suelo, (suelo muy denso tipo B2), pasando inicialmente de suelo muy denso en sus primeros metros, a suelo rígido a la profundidad de 20m, según EC8. También se puede observar que a los 30m se tiene una  $V_s$  de aproximadamente 620m/s, correspondiente a suelo muy denso o roca blanda, tipo B1 (según EC8).

Esto nos demuestra y verifica el aumento y grado de compactación de las Margas existentes en esta zona (G2).

Por otra parte, se puede apreciar en la zona (G2) un aumento paulatino de la presión de soterramiento de los sedimentos, hasta los 15m, en el que se experimenta una disminución. En particular, el perfil de velocidades de ondas S muestra una primera capa con velocidades heterogéneas y un gradiente de aumento elevado que va hasta los 15 primeros metros y de los 25 a los 30 metros de profundidad se podría decir que se tienen velocidades relativamente más homogéneas, las cuales estarían asociadas a sedimentos más consolidados.

Por último, en la zona G3 figura 33 se realizó una campaña de toma de datos, de mera comparativa para la verificación a efectos de variaciones por el efecto de la capa asfáltica, ya que dicha zona no estaba afectada, presentándose en su estado original.

A tal efecto se verificó una similitud de resultados con respecto a la zona anterior, y viendo así pues que la capa asfáltica no afecta a la toma de datos. Así pues se puede ver la diferencia marcada del estado de compactación de Margas, correspondiente a las tres zonas (G1, G2 y G3), según se muestran en las columnas estratigráficas (C1, C2 y C3), figuras 34, 35 y 36.

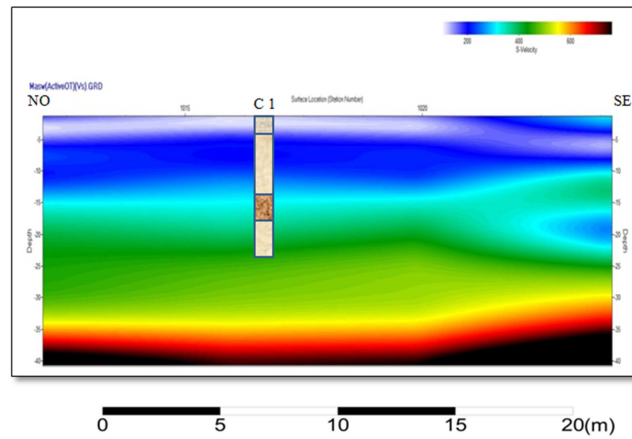


Figura 31. Perfil de velocidad de cizalla en 2D ( $V_s$  Según el método Masw, zona G1, calle Araucarias).

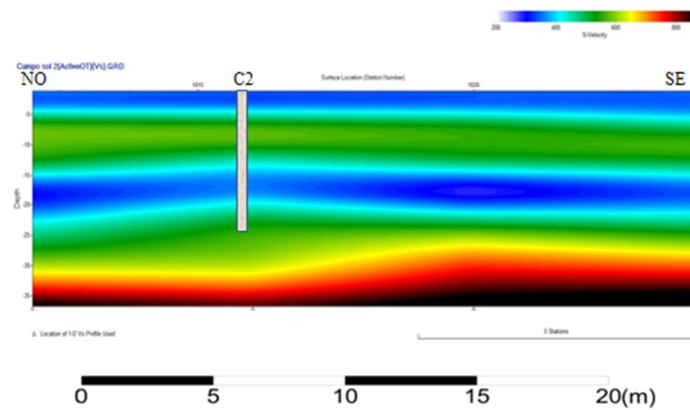


Figura 32. Perfil de velocidad de cizalla en 2D ( $V_s$  Según el método Masw, zona G2, calle Alobe).

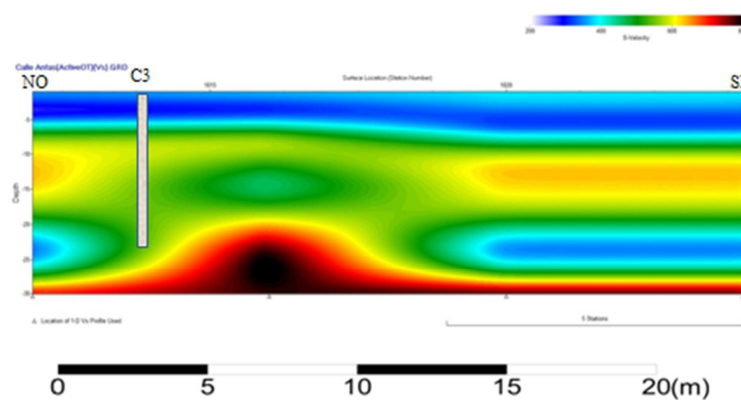


Figura 33. Perfil de velocidad de cizalla en 2D ( $V_s$  Según el método Masw, zona G3, explanada paralela a calle Alobe).





Tipo de Suelo	Z(m)	Formación
De 0,00-0,12 m: Capa asfáltica.	1	
De 0,12-5 m: Suelo muy blando, (Margas sin compactar).	2	
	3	
	4	
	5	
De 5-14 m: Suelo rígido, (Margas con más nivel de compactación).	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	
	13	
	14	
De 14-16 m: Suelo muy denso o roca blanda, tipo B2 según Navarro et, al., 213. (Margas con más nivel de compactación que la anterior).	15	
De 16-25 m: Suelo muy denso o roca blanda, tipo B1 según Navarro et, al., 213. (Margas aún más compactadas que la superficie anterior).	16	
	17	
	18	
	19	
	20	
	21	
	22	
	23	
	24	
	25	

Figura 34. Columna estratigráfica C1. (Zona G1, calle Araucarias).





Tipo de Suelo	Z(m)	Formación
De 0,00-0,12 m: Capa asfáltica.	1	
De 0,12-5 m: Suelo rígido. (Margas compactadas).	2	
	3	
	4	
	5	
De 5-14 m: Suelo muy denso o roca blanda, tipo B1 según Navarro et, al., 213. (Margas aún más compactadas que la superficie anterior).	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	
	13	
	14	
De 14-20 m: Suelo muy denso o roca blanda, tipo B2 según Navarro et, al., 213. (Margas menos compactadas que el nivel anterior).	15	
	16	
	17	
	18	
	19	
	20	
De 20-25 m: Suelo muy denso o roca blanda, tipo B1 según Navarro et, al., 213. (Margas más compactadas que la superficie anterior).	21	
	22	
	23	
	24	
	25	

Figura 35. Columna estratigráfica C2. (Zona G2, calle Alobe).







Tipo de Suelo	Z(m)	Formación
De 0,00-5 m: Suelo muy denso o roca blanda, tipo B2 según Navarro et, al., 213. (Margas con alta compactación).	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
De 5-9 m: Suelo muy denso o roca blanda, tipo B2 según Navarro et, al., 213. (Margas más compactadas que el nivel anterior).	6	
	7	
	8	
	9	
De 9-14 m: Suelo muy denso o roca blanda, tipo B2 según Navarro et, al., 213. (Margas aún más compactadas que el nivel anterior).	10	
	11	
	12	
	13	
	14	
De 14-25 m: Suelo muy denso o roca blanda, tipo B2 según Navarro et, al., 213. (Margas con disminución de compactación, respecto al el nivel anterior).	15	
	16	
	17	
	18	
	19	
	20	
	21	
	22	
	23	
	24	
	25	

Figura 36. Columna estratigráfica C3. (Zona G3, explanada paralela a calle Alobe).

En las figura 37, 38 y 39, se puede apreciar el registro de disparo de tomografía sísmica Vp en 2D.

En la Figura 37, correspondiente a la zona G1se aprecia el perfil de velocidad de Vp en función a la profundidad, viendo que hasta los 5m primeros se tiene una Vp de 400m/s y que a partir de los 8m se tiene una Vp de 800m/s. Observando en la zona en azul claro que va de los 20-26m de profundidad, una Vp de 1300m/s.

En la siguiente zona G2, se aprecia un aumento progresivo de Vp en función a la profundidad, observando que hasta los 8m se tiene una Vp de 1500m/s, de la franja de 8m hasta los 12m se tiene un Vp de 2500m/s y de los 12m hasta los 15m se tiene una Vp de 3500m/s.

Por último en la zona G3, tenemos un aumento progresivo de Vp hasta los 11m de profundidad (de 200-1800m/s), seguido de una disminución de Vp hasta la franja de los 14m (1500-1000m/s), la cual tras ésta nuevamente experimenta un aumento de Vp (1500m/s).

Esto como ya se comentó es debido a los cambios de niveles de compactación de Margas a esas profundidades.

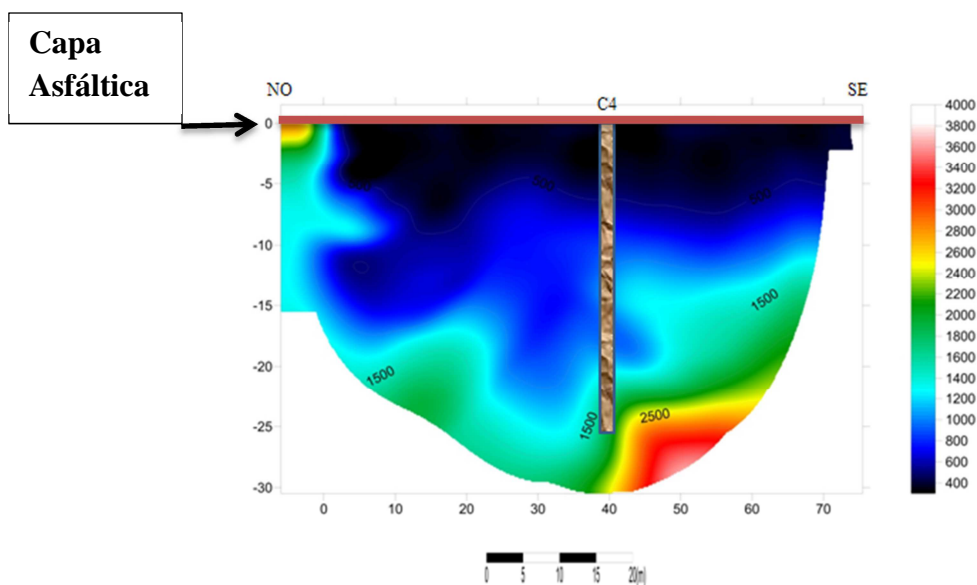


Figura 37. Perfil de velocidad de ondas compresionales (Vp en m/s, mediante tomografía sísmica). Zona G1, calle Araucarias.



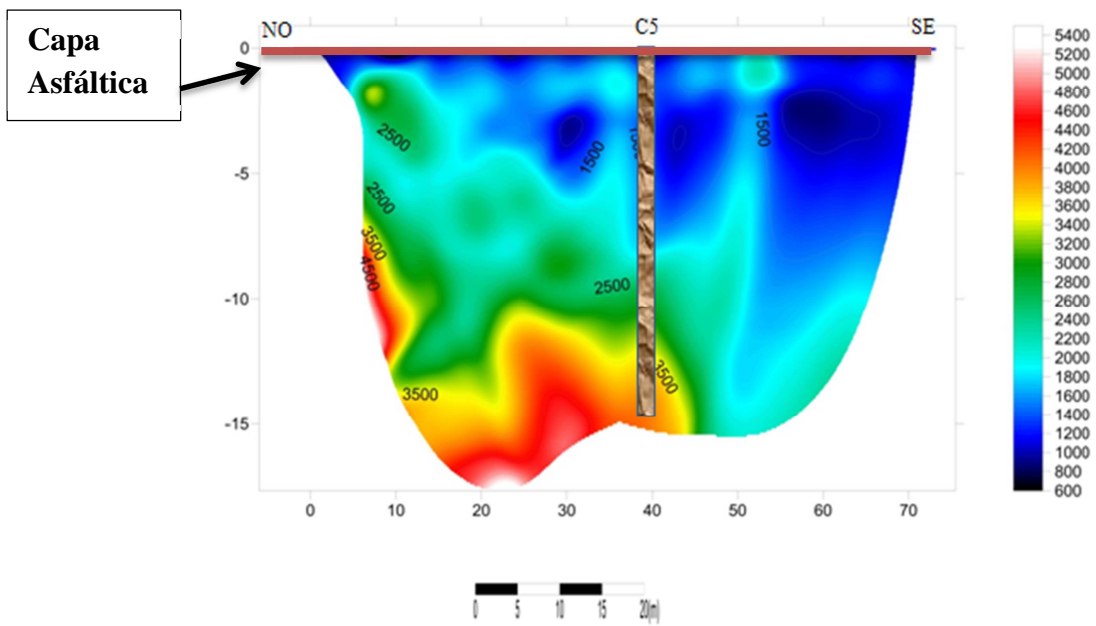


Figura 38. Perfil de velocidad de ondas compresionales ( $V_p$  en m/s, mediante tomografía sísmica). Calle Alobe.

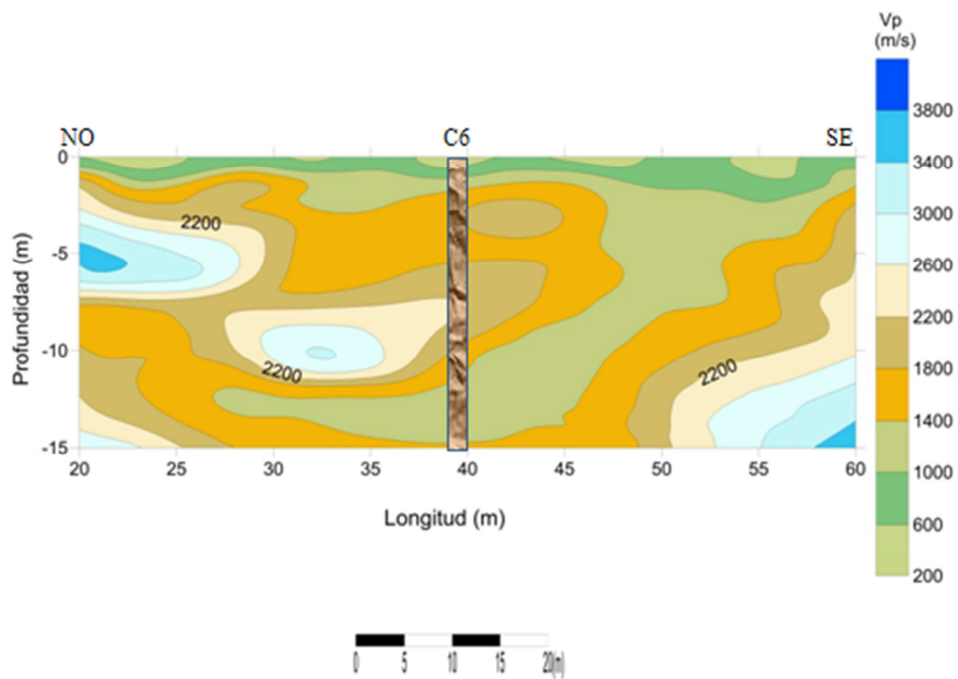


Figura 39. Perfil de velocidad de ondas compresionales ( $V_p$  en m/s, mediante tomografía sísmica). Explanada paralela a calle Alobe.

## 6.2 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

Utilizando los valores de velocidades de ondas P y S medidos, se calculó un conjunto completo de valores de parámetros geomecánicos para la zona de estudio. Los resultados de estos cálculos, presentados tanto por capas, como metro a metro (gradiente), se muestran en las figuras de la 40 a la 51, ambas inclusive, obtenidos mediante los programas empleados, pudiéndose calcular a la vez, con las ecuaciones empleadas en el punto 4.3 (cálculo de parámetros geomecánicos). Como ya se ha mencionado, los mismos son fundamentales en la geotecnia aplicada a la ingeniería civil para lograr el diseño adecuado y eficiente de una edificación, de acuerdo con las características elásticas del suelo, las cuales determinarán la respuesta del mismo ante los regímenes de esfuerzo que las obras civiles producen. La capacidad de carga ( $q_a$ ) fue calculada a partir de las velocidades de ondas de corte  $V_s$  y de la densidad estimada de  $1,9 \text{ gr/cm}^3$  correspondiente a las tres zonas de estudio (G1, G2 y G3).

Tabla 2. Capacidades de carga a los 5m, 10m, 15m, 20m y 30m de profundidad en la zona G1.


<b>qa (5m)</b>	<b>45,6 Kpa</b>	
<b>qa (10m)</b>	<b>104,88 Kpa</b>	
<b>qa (15m)</b>	<b>127,68 Kpa</b>	
<b>qa (20m)</b>	<b>136,8 Kpa</b>	
<b>qa (30m)</b>	<b>228 Kpa</b>	

Tabla 3. Capacidades de carga a los 5m, 10m, 15m, 20m y 30m de profundidad en la zona G2.

<b>qa (5m)</b>	<b>182,4 Kpa</b>	
<b>qa (10m)</b>	<b>228 Kpa</b>	
<b>qa (15m)</b>	<b>182,4 Kpa</b>	
<b>qa (20m)</b>	<b>136,8 Kpa</b>	
<b>qa (30m)</b>	<b>273,6 Kpa</b>	

Tabla 4. Capacidades de carga a los 5m, 10m, 15m, 20m y 30m de profundidad en la zona G3.

qa (5m)	182,4 Kpa
qa (10m)	273,6 Kpa
qa (15m)	264,48 Kpa
qa (20m)	264,48 Kpa
qa (30m)	319,2 Kpa

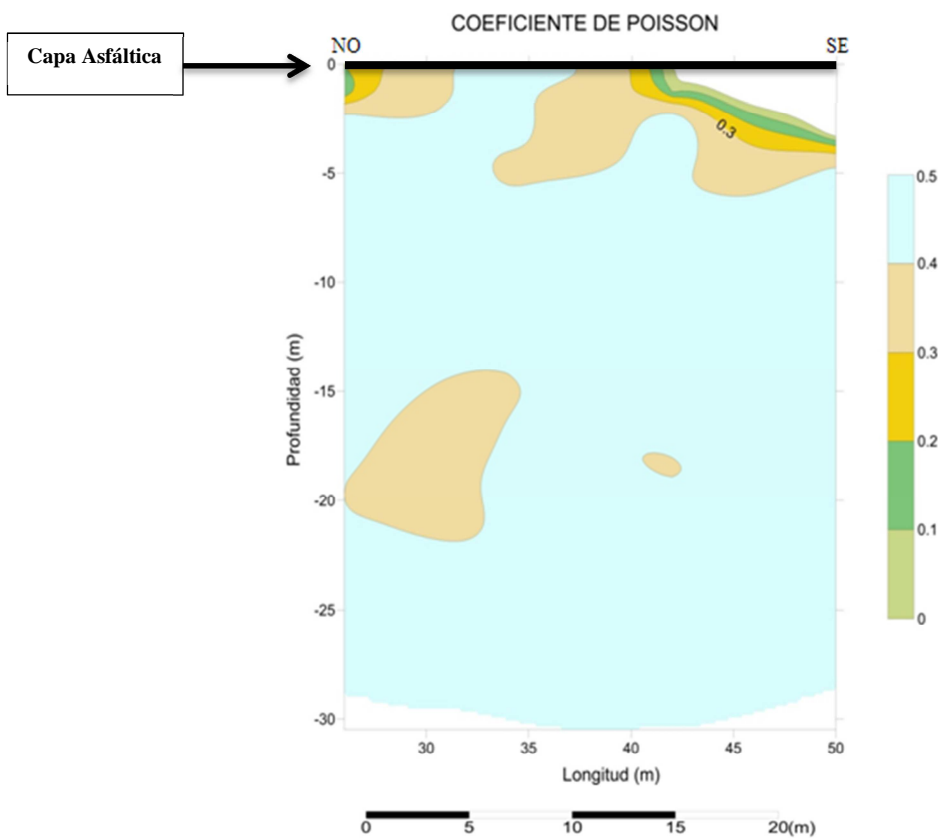


Figura 40. Sección de dispersión, Coeficiente de Poisson. Calle Araucarias (zona G1).

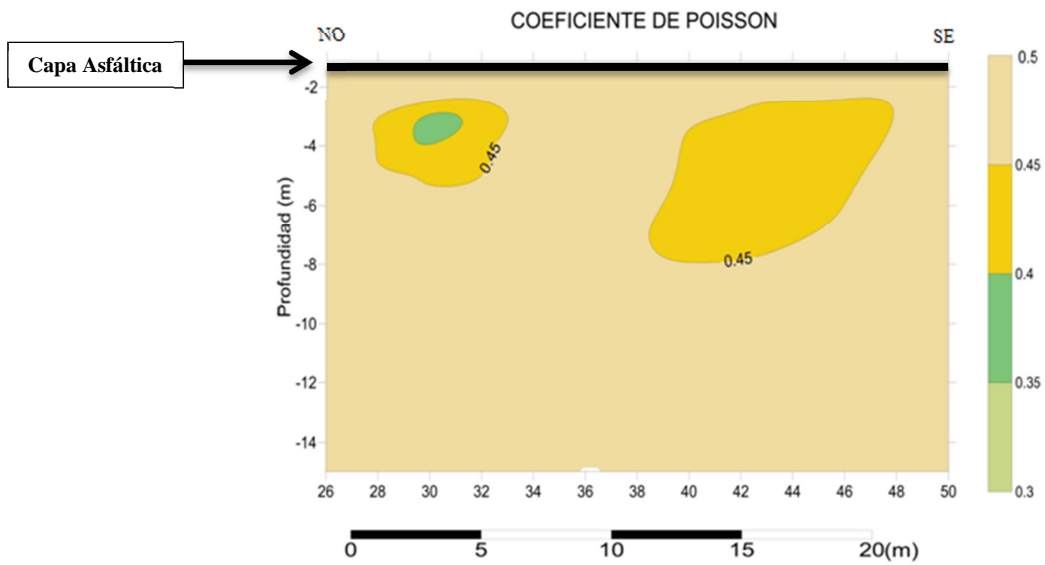


Figura 41. Sección de dispersión, Coeficiente de Poisson. Calle Alobe (zona G2).

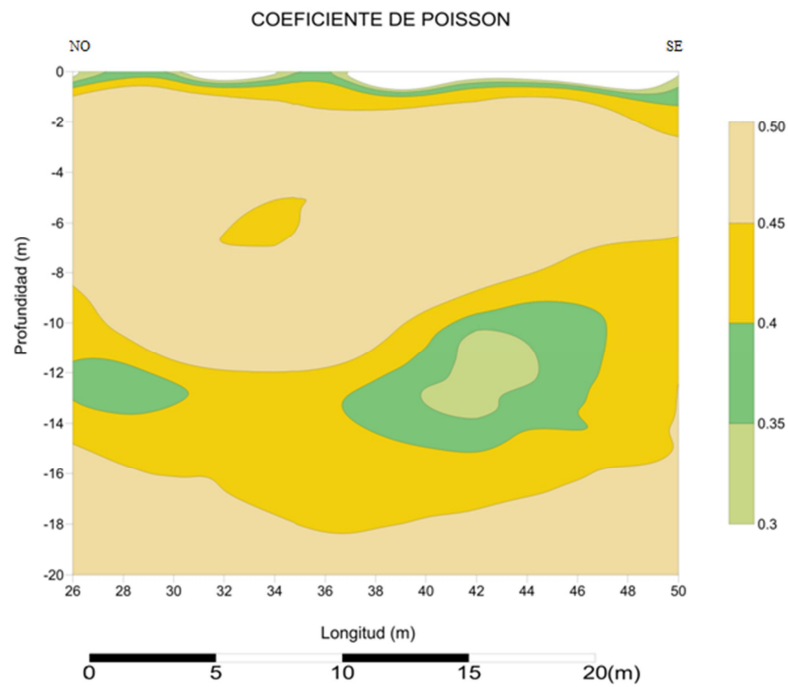


Figura 42. Sección de dispersión, Coeficiente de Poisson. Explanada paralela a calle Alobe (zona G3).

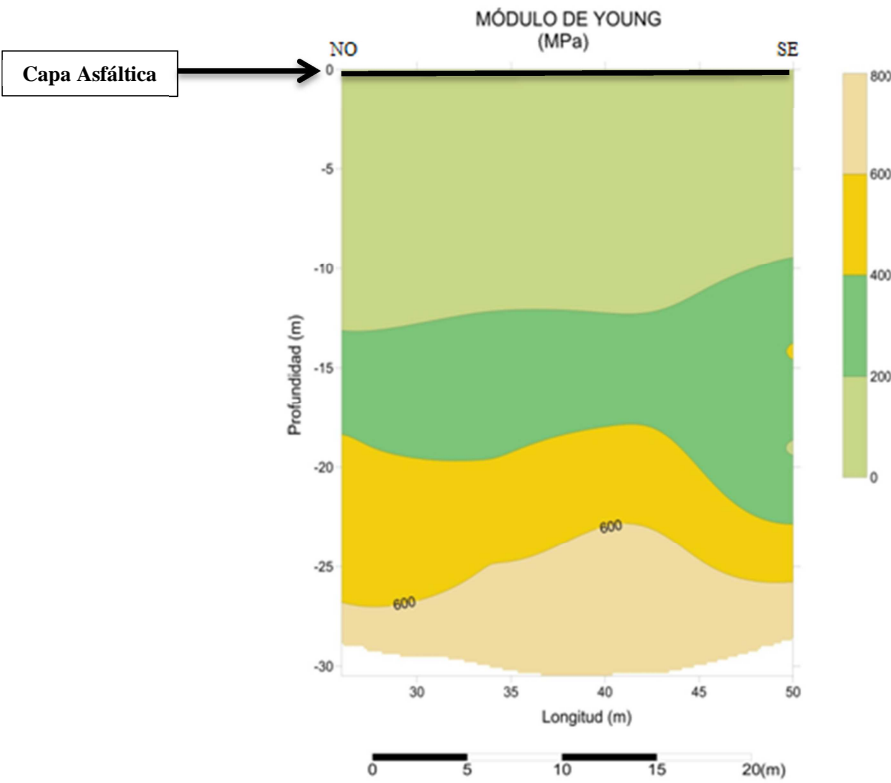


Figura 43. Sección de variación del Módulo de Young (E), calle Araucarias (zona G1).

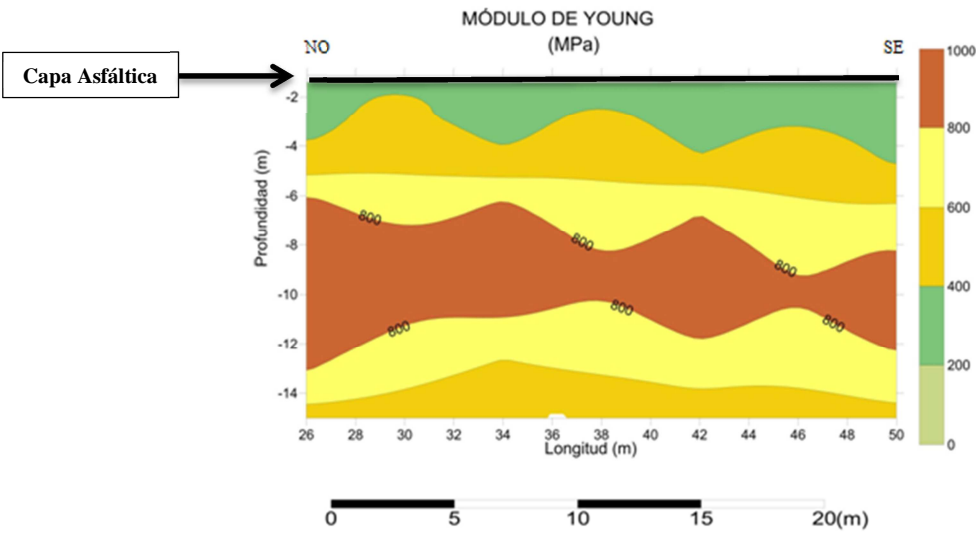


Figura 44. Sección de variación del Módulo de Young (E), calle Alobe (zona G2).

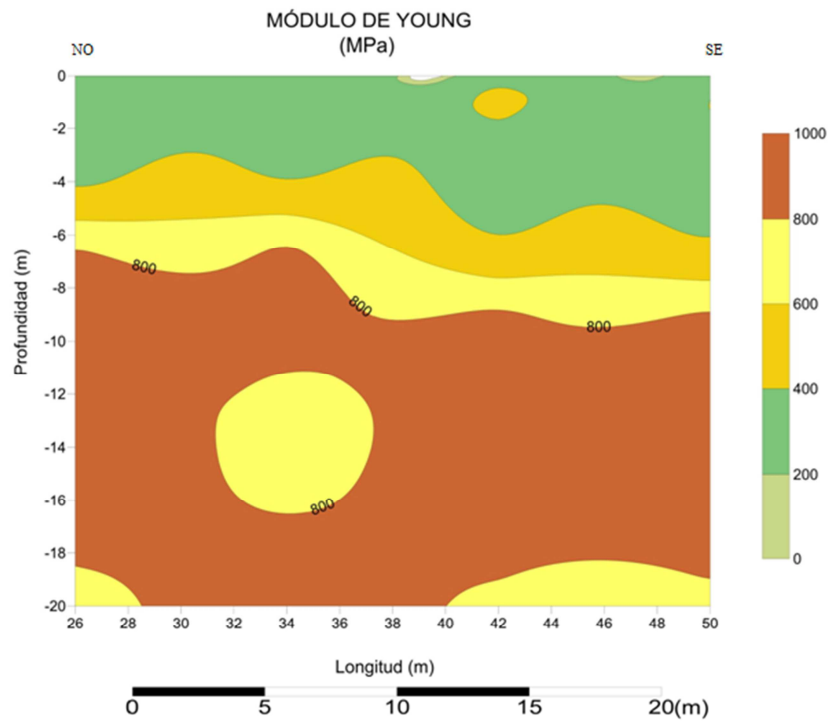


Figura 45. Sección de variación del Módulo de Young ( $E$ ), explanada paralela a calle Alobe (zona G3).

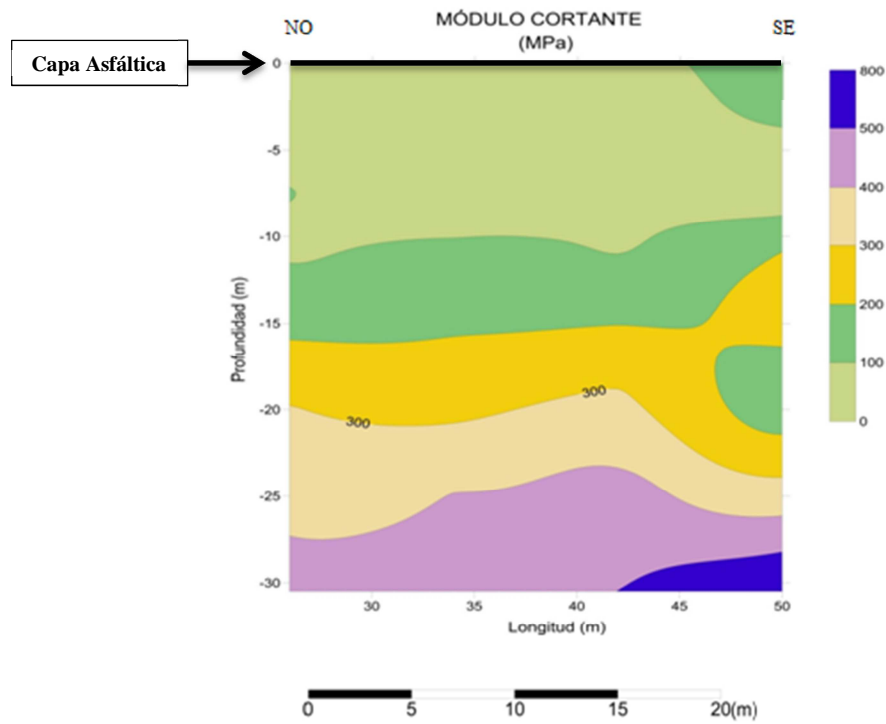


Figura 46. Sección de variación del Módulo de Cortante (G), calle Araucarias, (zona G1).

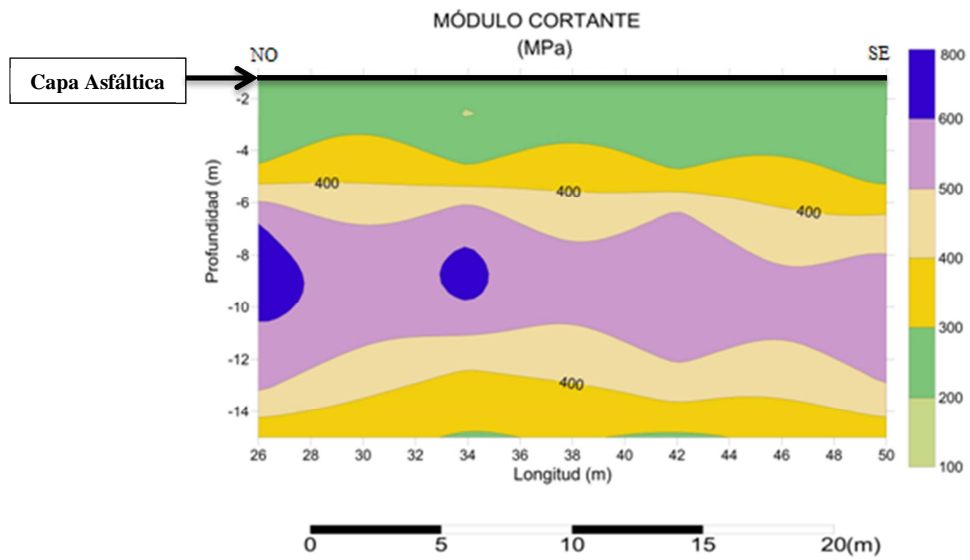


Figura 47. Sección de variación del Módulo de Cortante (G), calle Alobe, (zona G2).



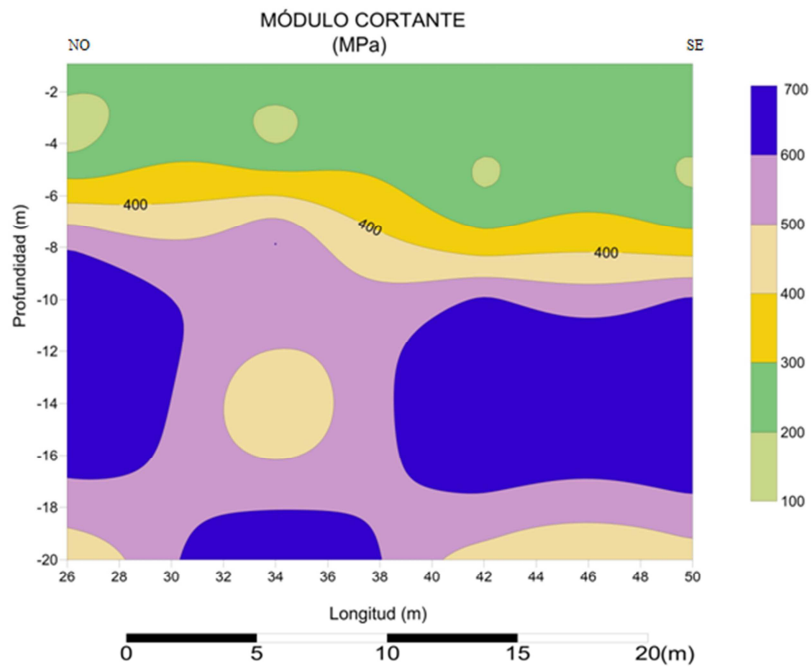


Figura 48. Sección de variación del Módulo de Cortante ( $G$ ), explanada paralela a calle Alobe, (zona G3).

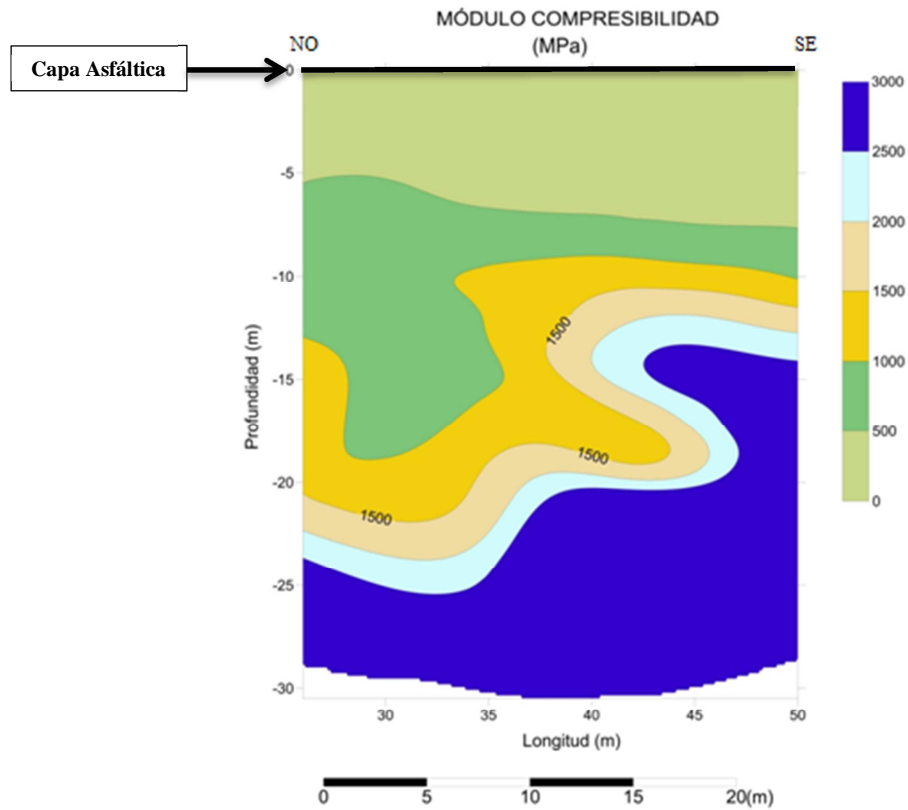


Figura 49. Sección de variación del Módulo de Compresibilidad (K).Calle Araucarias, (zona G1).

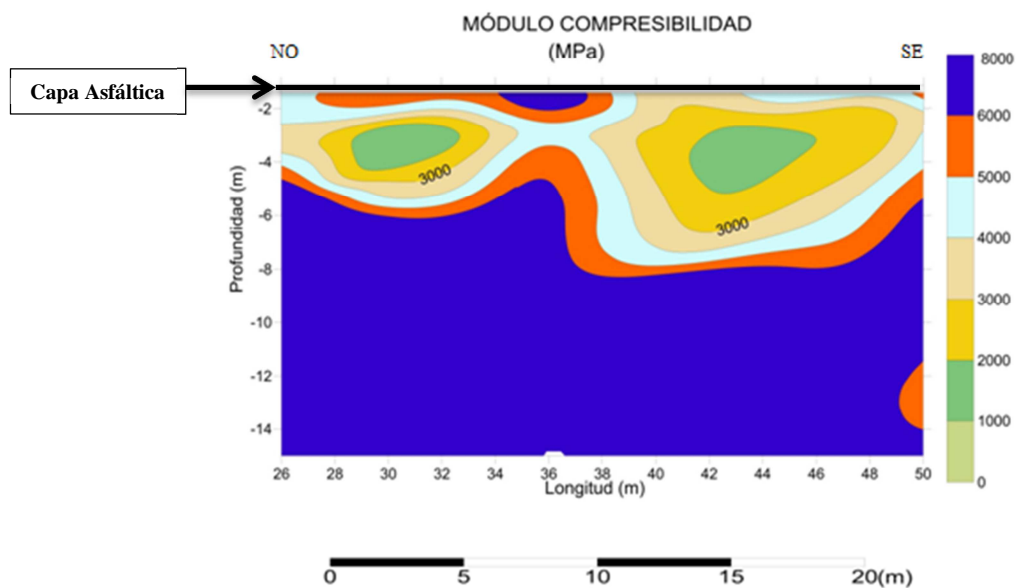


Figura 50. Sección de variación del Módulo de Compresibilidad (K).Calle Alobe, (zona G2).

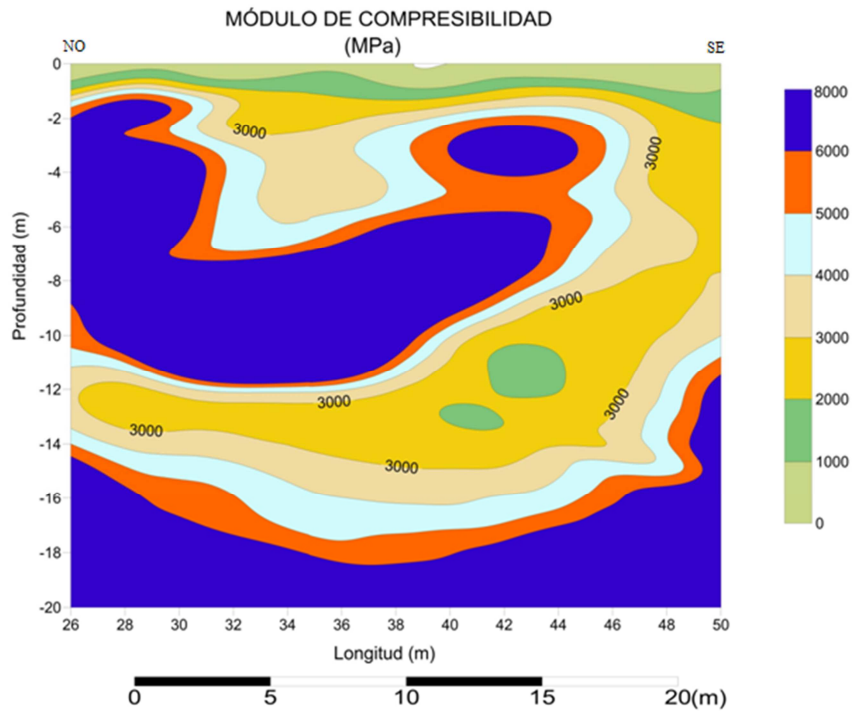


Figura 51. Sección de variación del Módulo de Compresibilidad (K).Explanada paralela a calle Alobe, (zona G3).

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

El análisis y la interpretación de los registros del método MASW y de tomografía sísmica (así como de los resultados derivados de ellos), en las zonas de calle Araucarias (zona G1), calle Alobe (zona G2) y explanada paralela a calle Alobe (zona G3), permite concluir que:

1. El método sísmico MASW demostró ser eficaz para la investigación de las velocidades de ondas de corte en un ambiente urbano con elevado nivel de ruido sísmico, esto tanto en términos de no invasividad como en el nivel de resolución y profundidad de investigación alcanzados. En particular, tendidos de 2 m de espaciamiento permitieron alcanzar profundidades de hasta 30 m en estas zonas (profundidad superior a la requerida para alcanzar los objetivos planteados).
2. La aplicación del método de tomografía sísmica en un ambiente urbano se encuentra severamente limitado por el elevado nivel de ruido sísmico inherente al mismo.
3. Con el uso de fuentes no explosivas, en nuestro caso con maza de 8 kg sobre una placa acerada para no dañar el pavimento, uso de método alternativo eficiente, que permite realizar estimaciones razonables de las velocidades de las ondas compresionales en tal ambiente.
4. Los valores calculados del coeficiente de Poisson, a través de las velocidades de ondas S y P, se encuentran dentro del rango correspondiente a secuencias de una serie detrítica margo-arenosa, lo cual coincide con lo esperado según la geología superficial de la zona.
5. El cálculo de los parámetros geomecánicos superficiales del subsuelo a través de los perfiles de velocidades de ondas P y S obtenidos mediante métodos geofísicos, probó ser una de las formas más rápidas y sencillas de

- lograrlo, y permite ampliar los alcances de la geofísica, especialmente en ambientes urbanos.
6. Además, los resultados de estos estudios tienen la ventaja de que proveen un muestreo *in situ* de las condiciones del subsuelo, en contra del empleo de muestras cuyas condiciones originales puedan resultar alteradas. Dichos resultados son fundamentales en la caracterización geotécnica del terreno, y son uno de los elementos primordiales para lograr el diseño eficiente y adecuado de una edificación u obra civil llevada a cabo.
  7. Con el resultado de los parámetros geomecánicos se pueden obtener y verificar posibles asentamientos incontrolados del terreno, así como el dimensionamiento de micro pilotes.
  8. Este trabajo pone de manifiesto la utilidad del método MASW y el uso del “landstreamer” para la adquisición de los perfiles de Vs. Este sistema ha demostrado ser una herramienta eficaz para reunir una gran cantidad de datos sísmicos en un ritmo muy rápido y con una alta relación señal/ruido en la etapa de la dispersión (Martínez-Pagán et al., 2012). Siendo esto último muy importante, ya que permitió obtener un mapa de clasificación de suelos más exhaustivo.
  9. La velocidades de cizalla realizados en la primera calle, se puede apreciar como los valores de Vs en la parte más superficial son muy bajos lo que se puede deber a mala compactación o presencia de rellenos antrópicos en el área, la estructura superficial es la causante de los asentamientos producidos en esta zona.
  10. En cuanto a la Vs30 y de acuerdo al Eurocodigo el suelo que se presenta en esta zona de estudio es un suelo rígido.

11. Como recomendación, se prevé un desmonte de la parte de la calle afectada por asentamientos, a la profundidad indicada según el aumento de Vs para salir de la zona de rellenos antrópicos, compactando con zahorra artificial hasta obtener la dureza deseada, según este método y en combinación con estudio de compactación proctor.
12. En cuanto a las viviendas existentes afectadas por dichos asentamientos, se prevé una densa malla de micro pilotes en su cimentación, de manera que se traspase la profundidad de rellenos antrópicos no compactados y se alcance la capacidad portante del terreno deseada.

**En términos generales las diferencias obtenidas en los resultados entre estos perfiles correspondientes a las tres zonas (G1, G2 y G3) son:**

- Las zonas G2 y G3 están afectados por un mayor nivel de ruido sísmico ambiental, a diferencia que la zona G1.
- En la zona G1, los 5 primeros metros se tiene una Vs muy baja, por debajo de 180 m/s, correspondiente a suelos muy blandos, (rellenos sin compactación).
- Margas existentes en zona G2 y G3, con un alto grado de compactación en general.
- En la zona G3 se verificó una similitud de resultados con respecto a la zona anterior (G2), y viendo así pues que la capa asfáltica no afecta a la toma de datos ni resultados.
- **Zona G1.** Hasta los 5m de profundidad suelo muy blando, (Margas sin compactar), **Zona G2** ya en los 5m suelo rígido (Margas

compactadas), **Zona G3** en los 5m suelo muy denso tipo B2 (correspondiente a un alto nivel de compactación de Margas).

- **Zona G1**. de 5-14m de profundidad suelo rígido (Margas con más nivel de compactación), **en G2** suelo muy denso o roca blanda (aumento del grado de compactación en Margas), **en G3** de 5-9m suelo muy denso tipo B2 (aumento compactación respecto al nivel anterior).
- **Zona G1**. de 14-16m de profundidad, suelo muy denso o roca blanda (aumento del grado de compactación de Margas), **en G2**. de 14-20m suelo muy denso o roca blanda tipo B2.( disminución del nivel de compactación respecto de capa superior), **en G3** suelo muy denso tipo B2, (aumento aún mayor de compactación respecto al nivel anterior)
- **Zona G1**.de 16-25 m de profundidad, suelo muy denso o roca blanda (con mayor grado de compactación en Margas, respecto a capas superiores), **en G2**, de 20- 25m suelo muy denso tipo B1 (aumento de compactación), **en G3** suelo muy denso tipo B2, (disminución del grado de compactación respecto a capa anterior de G3).
- La capacidad portante en zona G1 en los 5m primeros es muy baja (45,6 Kpa), correspondiente a rellenos existentes, a diferencia de las zonas G2 y G3 que es cuatro veces mayor, del orden de 182,4 Kpa.
- En la zona G1 se tiene una capacidad portante en aumento en función a la profundidad, viendo un salto considerable de la misma ya en los 10m (104,88 Kpa).



- La capacidad portante de la zona G2 aumenta progresivamente hasta los 10m de profundidad, decayendo hasta alcanzar los 20m, punto en el cual se produce un nuevo aumento, estando en los 30m a su mayor capacidad, alrededor de 273,6 Kpa.
- En la zona G3, la capacidad portante experimenta un aumento considerable y paulatino, viéndose en los 30m de profundidad una capacidad portante del orden de los 319,2 Kpa.

## 8. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

---

La obtención de valores de ondas P mediante métodos sísmicos de pozo (*e.g.* ensayos tipo *downhole*) representa una alternativa que vale la pena investigar y poner en práctica, y que permitiría complementar y ampliar los alcances de la investigación actual en esta área.

Cubicaciones y estudios económicos de proyecto para la mejora de taludes no consolidados, según este método.

Dimensionamiento de micro pilotes para un área determinada mediante estas técnicas estudiadas.

## 9. REFERENCIAS

---

- [1] Cetraro, F. Ingegneria geotecnica e geologia applicata. EPC Libri, Roma, Italia. (2007).
- [2] Eurocode 8. Design of structures for earthquakes resistance - Parte 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Europe Committee for Standardization(CEN), EN 1998.
- [3] Ivanov, J., C.B. Park, R.D. Miller, J. Xia and R. Overtone: "Modal separation before dispersion curve extraction by MASW method". Denver, Colorado. (2001)
- [4] Lay, T. y T. Wallace. Modern Global Seismology. Academic Press, California, Estados Unidos. (1995)
- [5] Louie, J. N. Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 91: 347-364. (2001).
- [6] L. González-García, M. Navarro, P. Martínez-Pagan, J. Pérez-Cuevas, A. García-Jerez, y F. Vidal. Estructura de velocidad superficial de la ciudad de Almería (SE España) a partir del análisis MASW. En 8th Asamblea Luso-Española de Geodesia y Geofísica, págs. 57-64. 2014.
- [7] Mendoza, J. Introducción a la Física de Rocas. Editorial Equinoccio, Ediciones de la Universidad Simón Bolívar, Caracas. (1998)
- [8] Palmer, D. An Introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. Geophysics, 46: 1508. (1981).

- [9] Park, C. B.: "Characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surface Wave". Seoul, Korea. (1995)
- [10] Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., and Ivanov, J., 2001, Characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) method: submitted to the Tenth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE) in Philadelphia in October 2001.
- [11] Park, C. B., N. Ryden and P. Ulriksen: *"The MASW method- what and where it is"*. Norway. (2003)
- [12] Park, C. B. R.D. Miller, y J. Xia. Detection of near-surface voids using surface waves. En SAGEEP99. (1999).
- [13] Park, C. B., R.D. Miller, J. Xia and J. Ivanov: "Characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) Method". Philadelphia. (2000)
- [14] Park, C. B., R.D. Miller, J. Xia and J. Ivanov: "Multichannel seismic surface-wave methods for geotechnical application". St. Louis. (2000)
- [15] P. Martínez-Pagan, M. Navarro, J. Pérez-Cuevas, A. García-Jerez, F.J. Alcalá, S. Sandoval-Castaño, y I. Alhama. Comparative study of SPAC and MASW methods to obtain the Vs30 for seismic site effect evaluation in Lorca town, SE Spain. En 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. (2012).
- [16] P. Martínez Pagán. Prospección Geofísica - 2. Universidad Politécnica de Cartagena 2008.
- [17] Redpath, B. B. Seismic refraction exploration for engineering site investigations. Technical Report E-73-4. Explosive Excavation Research Laboratory, Livermore, California. (1973)

- [18] Rodríguez Estrella, T. Consideraciones sobre la explotación de los recursos geotérmicos en las Cuencas Neógenas de la Región de Murcia (2005).
- [19] Rodríguez Estrella, T. "Mapa Geológico de la Región de Murcia". (1993)
- [20] Rucker, M. L. Seismic refraction interpretation with velocity gradient and depth of investigation. Proceedings of the Geophysics 2002 conference, April 15-19, Los Angeles, California. (2002)
- [21] Tezcan, S. S., Keceli, A., y Z. Ozdemir. Allowable bearing capacity of shallow foundations base on shear wave velocity. Geotechnical and Geophysical Engineering, 24:203-218. (2006)
- [22] The University of Kansas. Kansas geological survey. 2014. URL <http://www.kgs.ku.edu>.
- [23] Xia, J., C.B. Park, J.A. Hunter, J.B. Harris and J. Ivanov: "Comparing shear-velocity profiles from multichannel Analysis of surface wave with borehole measurement". Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE). 181-190. (2002)
- [24] Xia, J., R.D. Miller and C.B. Park: "Inversion of high frequency surface wave with fundamental and higher modes". Journal Applied Geophysics. (2003)